

LUCIENE STAMATO DELAZARI

EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DRENAGEM A PARTIR DE MODELOS DIGITAIS DE ALTITUDE

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Quintino Dalmolin
Co-orientador: Prof. Msc. Antonio José Berutti Vieira

CURITIBA

1996

EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DRENAGEM A PARTIR DE MODELOS DIGITAIS DE ALTITUDE

POR

LUCIENE STAMATO DELAZARI

Dissertação aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:


Prof. Dr. QUINTINO DALMOLIN - Orientador
PRESIDENTE


Prof. MSc. ANTONIO JOSÉ BERUTTI VIEIRA - Co-Orientador


Prof. Dr. HELIO OLYMPIO DA ROCHA - Membro


Prof. Dr. NALDY EMERSON CANALI - Membro

DEDICATÓRIA

Aos meus pais.

A James.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná - UFPR, pela oportunidade do curso, com o auxílio em materiais e equipamentos.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudo.

Ao Professor Quintino Dalmolin pelo apoio e sugestões fornecidas.

Ao professor Antonio José Berutti Vieira pela dedicação e ajuda durante todo o trabalho.

Ao bolsista de iniciação científica José Leandro Moraes pelo auxílio durante a etapa de digitalização.

Ao departamento de Geologia pela permissão de uso de equipamentos e “softwares”, e em especial ao aluno Francisco Valdyr da Silva pela ajuda e sugestões.

Ao engenheiro Guaraci Erthal do Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE, pelo auxílio na parte de programação.

Ao CIEG - Centro Integrado de Estudos de Geoprocessamento, pela permissão para utilização dos equipamentos.

À SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná, pela permissão de uso do arquivo da rede de drenagem já digitalizada.

Aos colegas e amigos do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná pela amizade e apoio em todos os momentos.

A todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUÇÃO	1
2 MODELO DIGITAL DE ALTITUDE.....	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS	7
2.2.1 Fontes de dados cartográficos	8
2.3 GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ALTITUDE.....	10
2.3.1 Estruturas de dados para Modelos Digitais de Altitude	11
2.3.1.1 Matriz de altitudes	11
2.3.1.2 Rede Irregular Triangulada.....	12
2.3.1.3 Comparação entre matrizes de altitudes e TIN.....	14
2.3.2 Interpolação dos dados	15
2.3.2.1 Métodos de interpolação	16
2.3.2.1.1 Ponderação pelo inverso da distância.....	17
2.3.2.1.3 Interpolação em redes triangularizadas	18
3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	23
3.1 INTRODUÇÃO.....	23
3.2 CONECTIVIDADE	25
3.3 AFINAMENTO.....	28
4 EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DRENAGEM.....	35
4.1 INTRODUÇÃO.....	35

4.2 ABORDAGENS PARA O RECONHECIMENTO AUTOMÁTICO DAS REDES DE DRENAGEM	36
4.2.1 Reconhecimento de pixels do DEM como pixels da drenagem usando o conceito “mais alto que”	37
4.2.2 Reconhecimento das redes de drenagem usando a informação da direção de drenagem.	39
4.2.3 Reconhecimento de redes de drenagem combinando as duas abordagens anteriores ...	42
4.3 MÉTODO DE EXTRAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM A PARTIR DA ESQUELETIZAÇÃO DE UM DEM.....	43
4.3.1 Extrair os canais de drenagem por meio da esqueletização em vários níveis.....	44
5 METODOLOGIA	50
5.1 INTRODUÇÃO.....	50
5.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS	52
5.2.1 Digitalização das cartas na escala 1:10.000	52
5.3 GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ALTITUDE.....	61
5.3.1 Estrutura conceitual do SPRING.....	61
5.3.2 Utilização do SPRING	63
5.3.2.1 Criação do banco de dados	65
5.3.2.2 Criação do projeto	66
5.3.2.3 Geração do Modelo Digital de Altitude	72
5.4 EXTRAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM.....	78
6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	88
6.1 ANÁLISE DA EXTRAÇÃO REALIZADA A PARTIR DO DEM TIN	89
6.1.1 Parâmetro $k_T = 4$	89
6.1.1 Parâmetro $k_T = 5$	90
6.1.1 Parâmetro $k_T = 6$	90
6.2 ANÁLISE DA EXTRAÇÃO REALIZADA A PARTIR DO DEM INVERSO DA DISTÂNCIA	94

6.2.1 Parâmetro $k_T = 4$	94
6.2.2 Parâmetro $k_T = 5$	94
6.2.2 Parâmetro $k_T = 6$	95
6.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS INTERPOLADORES	99
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
7.1 CONCLUSÕES.....	101
7.2 RECOMENDAÇÕES	104
ANEXO 1 - ARTICULAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	105
ANEXO 2 - Digitalização com o MaxiCAD das curvas de nível equidistantes de 10 metros.....	106
ANEXO 3 - Programa para converter um arquivo em formato .SEQ do MaxiCAD para o formato .ASC (programa 1)	108
ANEXO 4 - Programa para converter um arquivo em formato .SEQ do MaxiCAD para o formato .ASC (programa 2)	110
ANEXO 5 - Exemplo do arquivo ASC usado como entrada para o SPRING	113
ANEXO 6 - Mapa da rede de drenagem da área de estudo	114
ANEXO 7 - Mapa original da área de estudo	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas do modelamento digital de superfícies	7
Figura 2 - Matriz de altitudes ou grid regular	12
Figura 3 - Rede Irregular Triangulada (TIN)	13
Figura 4 - Conjunto de pontos amostrais para triangulação	19
Figura 5 - Triângulos de Delaunay	20
Figura 6 - Diagrama de Voronoi	21
Figura 7 - Triangulação de Delaunay e polígonos de Voronoi	22
Figura 8 - Ilustrações de conectividade	26
Figura 9 - Definições de pixels conectados	28
Figura 10 - Exemplos de esqueletos	30
Figura 11 - Exemplo do afinamento de um objeto	31
Figura 12 - Exemplo do afinamento aplicado à silhueta de aviões	32
Figura 13 - Exemplos do algoritmo de afinamento	33
Figura 14 - Mapa de curvas de nível de um relevo artificial	38
Figura 15 - Pixels que pertencem ao vale (pretos), reconhecidos no DEM do relevo artificial da figura 14	39
Figura 16 - Rede de drenagem extraída usando o algoritmo de Jenson e Domingue para a indicação das direções de drenagem	41
Figura 17 - Valores de k_T para uma vizinhança 3 x 3	46
Figura 18 - Resultado do primeiro estágio do algoritmo de esqueletização	46
Figura 19 - Resultado final do algoritmo de esqueletização.	48
Figura 20 - “Loops” de um pixel, resultantes da natureza discreta do DEM	49
Figura 21 - Rede de drenagem extraída após os procedimentos de enumeração da rede	49
Figura 22 - Fluxograma de trabalho	51
Figura 23 - Modelo Digital de Altitude gerado com o “software” SURFER a partir das curvas de nível mestras da folha 398 utilizando o método de interpolação por redes triangularizadas	56

Figura 24 - Mapa da folha 398 gerado com o “software” SURFER a partir do DEM contendo apenas as curvas de nível mestras	57
Figura 25 - Curvas de nível mestras da folha 398, digitalizadas com o MAXICAD.....	58
Figura 26 - Modelo Digital de Altitude gerado com o “software” SURFER a partir da folha 398 com curvas de nível eqüidistantes de 10 metros utilizando o método de interpolação por redes triangularizadas	59
Figura 27 - Mapa da folha 398 gerado com o “software” SURFER a partir do DEM contendo as curvas de nível eqüidistantes de 10 metros	60
Figura 28 - Janela principal do SPRING.....	66
Figura 29 - Janela do SPRING para entrada das propriedades do Banco de dados	67
Figura 30 - Janela do SPRING para inserção de dados de um projeto.....	68
Figura 31 - Janela do SPRING para edição do projeto	71
Figura 32 - Importação dos dados no SPRING.....	72
Figura 33 - DEM gerado pelo interpolador de ponderação pelo inverso da distância	74
Figura 34 - DEM gerado pelo interpolador TIN	75
Figura 35 - Refinamento do DEM para geração da imagem.....	76
Figura 36 - Imagem refinada a partir do DEM gerado pelo interpolador de ponderação pelo inverso da distância	77
Figura 37 - Imagem refinada a partir do DEM gerado pelo interpolador TIN.....	78
Figura 38 - Reprodução do DEM TIN feita pelo programa SKEL	81
Figura 39 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 4$	81
Figura 40 - Sobreposição das figura 38 e 39	82
Figura 41 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 5$	82
Figura 42 - Sobreposição das figura 38 e 41	83
Figura 43 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 6$	83
Figura 44 - Sobreposição das figuras 38 e 43	84
Figura 45 - Reprodução do DEM inverso da distância feita pelo programa SKEL	84
Figura 46 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 4$	85
Figura 47 - Sobreposição das figura 43 e 44	85
Figura 48 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 5$	86
Figura 49 - Sobreposição das figuras 45 e 48	86

Figura 50 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 6$	87
Figura 51 - Sobreposição das figuras 45 e 50	87
Figura 52 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador TIN, com parâmetro $k_T = 4$	91
Figura 53 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador TIN, com parâmetro $k_T = 5$	92
Figura 54 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador TIN, com parâmetro $k_T = 6$	93
Figura 55 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador de ponderação pelo inverso da distância, com parâmetro $k_T = 4$	96
Figura 56 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador de ponderação pelo inverso da distância, com parâmetro $k_T = 5$	97
Figura 57 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador de ponderação pelo inverso da distância, com parâmetro $k_T = 6$	98

RESUMO

A obtenção da rede de drenagem por técnicas manuais é uma tarefa tediosa e demorada. Na literatura internacional encontram-se vários métodos para a extração automática desta rede a partir de Modelos Digitais de Altitude (Digital Elevation Models - DEM). Entretanto, os principais “softwares” desenvolvidos no Brasil, voltados para a geração de bases de dados cartográficos e para Sistemas de Informação Geográfica, não dispõem deste tipo de ferramenta. Assim, encontrou-se no programa SKEL, desenvolvido na Universidade de Israel e que é de domínio público, uma alternativa simples para este fim. Com o presente trabalho, descreve-se uma metodologia onde se utiliza o programa SKEL para a extração da rede de drenagem a partir de um DEM. A grande vantagem encontrada com este método é que o processo de extração pode ser realizado em aproximadamente 10 minutos para uma área aproximada de 25 km². As principais limitações dizem respeito aos passos intermediários de conversão dos formatos dos arquivos, bem como da geração do DEM.

ABSTRACT

The obtainment of drainage network from manual techniques is a tedious and time consuming task. In the international bibliography there are methods to automatic extraction of drainage networks from Digital Elevation Models (DEM). However, the main softwares developed in Brazil which aim at producing digital cartographic data bases and Geographical Information Systems (GIS) do not present this kind of tool. So, we found in SKEL program, which was developed at the Israel University, a simple alternative to extract the drainage network. With the present work we describe a methodology where the SKEL program is used to extract the drainage network from a DEM. The greatest advantage found in this method is that the extraction process can be performed in about 10 minutes to an area of 25 km². The main restriction deals with intermediary processes of conversion of file formats, as well as DEM generation.

1 INTRODUÇÃO

Segundo VILLELA E MATOS (1975), a rede de drenagem é uma das características físicas mais importantes de uma bacia hidrográfica, sendo constituída pelo rio principal e seus tributários. O estudo da sua geometria possui uma importância muito grande dentro de diversas áreas de estudo, tais como hidrologia, geomorfologia, pedologia, geologia, entre outras. As redes de drenagem constituem um elemento importante nos estudos de desenvolvimento ambiental, além de formarem parte integrante dos Sistemas de Informação Geográfica (GIS - Geographical Information Systems), no que diz respeito às análises e gerenciamento de recursos naturais.

O método usual de obtenção das redes de drenagem consiste em traçá-las a partir de fotos aéreas ou digitalizá-las a partir de mapas topográficos. Isto nem sempre é prático, devido a problemas de manuseio e uniformidade dos dados oriundos de vários mapas em diferentes escalas, especialmente se são necessários dados detalhados para uma grande região. Segundo MARK (1984), a utilização de digitalizadores auxiliou na fase de medidas, simplificando-a e reduzindo seu tempo de demanda. Entretanto, se por um lado a obtenção de elementos derivados das redes de drenagem foi parcialmente automatizada, a etapa de digitalização tornou-se tediosa, sendo que a rede de drenagem ainda necessitava ser identificada. Além disto, a informação a respeito da drenagem que pode ser obtida a partir da rede de canais nos mapas topográficos pode estar incompleta, devido à omissão de pequenos ramos da rede de drenagem, inconsistências de interpretação e efeitos de generalização cartográfica.

Os Modelos Digitais de Altitude (DEM - Digital Elevation Model), são representações digitais de superfícies terrestres. Conforme WEIBEL e HELLER (1991) os DEM's atualmente se constituem de elementos fundamentais em GIS, auxiliando na modelagem, análise e visualização da superfície da Terra. Além disso, podem ser desenvolvidas várias ferramentas para auxiliar e mesmo automatizar as tarefas de extração de informações a partir deles. Como exemplo pode-se citar o desenvolvimento de técnicas automáticas para extrair, armazenar e prover medidas a respeito das redes de drenagem, diretamente a partir dos DEM's.

Segundo BAND (1986) em 1975, PEUCKER e DOUGLAS empregaram um método onde os pixels convexos eram marcados como cursos de água potenciais e pontos de cume. MARK (1983) comparou este método a uma outra abordagem que acumulava a área de drenagem, delineando as linhas de drenagem principais. Este mesmo autor concluiu que o último método, embora consumisse maior esforço computacional, possuía um conjunto de canais de drenagem conectados, melhores do que os segmentos tipicamente quebrados e inconsistentes gerados pelo método de Peucker e Douglas. Ainda segundo o autor MARKS et al. (1982) e JENSON (1985), usaram uma técnica de "crescimento" da bacia, mas que não extraía explicitamente a drenagem.

TRIBE (1992), desenvolveu um método para delinear a rede de drenagem e assinalar as direções de drenagem em um DEM. É por meio da indicação destas direções de drenagem que a rede é extraída. Mais recentemente, MEISELS et al. (1995) propuseram um algoritmo para a extração da rede de drenagem que processa um DEM no formato imagem, realizando a sua esqueletização. Como resultado final do algoritmo, obtém-se a rede de drenagem, com diferentes graus de densidade. O programa para realizar a extração, chamado

SKEL, foi desenvolvido na Universidade de Israel, está disponível e pode ser obtido via Internet.

Dentro deste contexto pode-se perceber a importância de realizar a extração das redes de drenagem a partir dos DEM's. Atualmente os "softwares" desenvolvidos no Brasil, como por exemplo o MaxiCAD e SPRING, não possuem ferramentas que possibilitem a extração das redes de drenagem de maneira automática ou semi-automática.

Neste sentido, pretende-se desenvolver uma metodologia para a extração automática das redes de drenagem a partir de DEM's. Para tanto serão realizadas as etapas de coleta dos dados, por meio do "software" MaxiCAD, geração do DEM, utilizando o "software" SPRING e extração da drenagem, por meio do programa SKEL. Será também analisado qual o modelo de interpolação dos dados utilizado para gerar o DEM produzirá o melhor resultado para a extração da rede de drenagem.

Visando integrar outras áreas de estudo, escolheu-se como teste a mesma área do projeto de Mapeamento Digital do Sistema Aquífero Cárstico (VIEIRA et al, 1996), que pretende estudar este sistema em vários aspectos, sendo assim a área de estudo delimitada pelo aquífero.

O trabalho será dividido basicamente em seis tópicos. A parte relativa a "Modelos Digitais de Altitude" refere-se à revisão da literatura a respeito dos DEM's, descrevendo as formas de aquisição dos dados, modelos de interpolação e os interpoladores mais utilizados.

Em seguida, no item "Processamento Digital de Imagens" é feita uma revisão sobre alguns conceitos relacionados ao assunto, como conectividade e afinamento de objetos;

tais conceitos estão embutidos no método utilizado para realizar a extração da rede de drenagem.

O item “Métodos de Extração de Redes de Drenagem” aborda os principais métodos já desenvolvidos para esta tarefa e descreve em maiores detalhes aquele que será utilizado no trabalho. A seguir são descritas as metodologias empregadas no desenvolvimento do trabalho, abordando-se as etapas de coleta dos dados, geração do DEM e extração da rede de drenagem.

No item “Discussão dos Resultados” são apresentadas as análises dos resultados e, por fim, são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 MODELO DIGITAL DE ALTITUDE

2.1 INTRODUÇÃO

Atualmente é cada vez maior o número de pesquisas relacionadas ao desenvolvimento e aplicação dos Modelos Digitais de Terreno (DTM - Digital Terrain Model). Embora a literatura a respeito do tema seja vasta, alguns conceitos básicos são considerados importantes. Dessa forma, serão revisados neste capítulo os conceitos básicos a respeito do assunto.

MILLER e LAFLAME já em 1958 constatavam que uma representação conveniente da superfície da Terra é uma necessidade para muitos problemas de engenharia, científicos e militares. O uso e a natureza dos dados relacionados ao terreno, apresentados na forma de mapas topográficos, modelos tri-dimensionais e perfis são exemplos comuns de tais representações, mas que são projetadas para a interpretação humana e utilização em processos mentais e manuais. Segundo os autores, muitos destes processos nos quais são utilizadas as informações relativas ao terreno, para obtenção de respostas numéricas a determinados problemas, podem ser manuseados por um computador.

De acordo com LEBERL (1973), foi exatamente alguns anos antes, em 1955, que surgia o conceito de DTM. Criado no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, seu objetivo era automatizar algumas fases do projeto de rodovias. Foram encontradas então, aplicações para problemas específicos em outros projetos de engenharia.

Para WEIBEL E HELLER (1991), um Modelo Digital de Terreno pode ser entendido como uma representação digital de uma superfície terrestre. Atualmente, constitui-se de um elemento fundamental em Sistemas de Informações Geográficas (GIS - Geographical Information Systems) auxiliando na modelagem, análise e visualização da superfície da Terra. Para MEISELS et al. (1995), os DTM's são fontes valiosas de informação pois podem produzir outros produtos tais como curvas de nível, declividade, aspecto, redes de drenagem, bacias hidrográficas, entre outros. Além disso, segundo WEIBEL E HELLER (1991), sabe-se hoje que um DTM pode ser usado para modelagem de qualquer superfície variando continuamente, como por exemplo temperatura, densidade populacional, dados geológicos, etc.

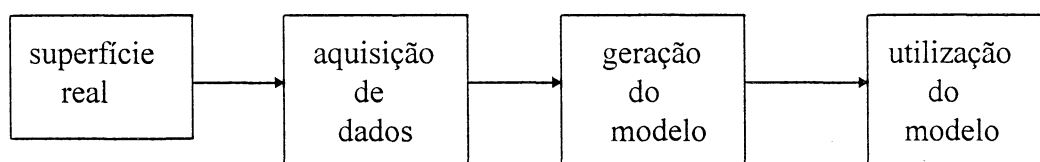
BURROUGH (1986) argumenta que o termo Modelo Digital de Altitudes (DEM - Digital Elevation Model) é preferível para modelos que contenham somente dados de altitude, porque o termo terreno frequentemente implica em atributos ambientais que são diferentes da altitude da superfície terrestre. Neste trabalho será adotada esta nomenclatura, devido à utilização de dados de altitude.

Por possuírem diversas aplicações, são utilizadas várias técnicas e métodos para o desenvolvimento dos DEM's. Para FELGUEIRAS (1994), o processo de modelagem digital de terreno compreende basicamente três etapas, mostradas na figura 1: aquisição do conjunto de amostras, geração do modelo e utilização do modelo gerado. Conforme MITISHITA (1994), para PETTINATI (1983) estas três etapas podem ser definidas da seguinte maneira:

a) aquisição do conjunto de amostras: obtenção de informações da superfície real que possibilite a caracterização matemática do modelo;

- b) geração do modelo: elaboração de um modelo matemático, composto por estruturas de dados e funções de interpolação que simulem o comportamento da superfície real;
- c) utilização do modelo gerado: utilização do modelo em substituição à superfície real.

Figura 1 - Etapas do modelamento digital de superfícies



Fonte: MITISHITA (1994, p.51)

Segundo KUMLER (1994), apesar do aumento da capacidade dos dispositivos de armazenamento e do aumento da velocidade dos processadores, sempre haverá a limitação em espaço de armazenamento e tempo de processamento. Dentro destas limitações, entretanto, é desejável a representação mais acurada possível. Para tanto, deve-se escolher o modelo de dados apropriado e, se este for irregularmente espaçado, o melhor conjunto de pontos.

2.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Conforme WEIBEL e HELLER (1991), a escolha da fonte e das técnicas de amostragem dos dados são aspectos importantes para a qualidade do DEM. Para MENEZES (1992), se a amostragem for imperfeita, não há como “compensar” utilizando um interpolador

mais sofisticado. Ainda segundo este autor, a aquisição dos dados é usualmente a fase que consome mais tempo e a de maior custo em relação ao processo total para a geração do DEM.

De acordo com WEIBEL e HELLER (1991), os dados para um DEM deveriam consistir de observações sobre a altitude e, se possível, informações adicionais sobre o fenômeno que influencia de maneira significativa a forma da superfície do terreno (feições estruturais como canais de drenagem e divisores de água).

Atualmente, a maioria dos dados para DEM são obtidos de três fontes: levantamento de campo, coleta fotogramétrica e fontes cartográficas. No presente trabalho será abordado apenas o item de obtenção dos dados por meio de fontes cartográficas. Os demais itens não serão abordados por estarem fora do escopo do trabalho.

2.2.1 Fontes de dados cartográficos

Segundo WEIBEL e HELLER (1991), é possível obter DEM's a partir de documentos cartográficos, tais como mapas de curvas de nível e perfis. É uma técnica de coleta de dados usada em grandes projetos, devido aos altos custos dos métodos topográficos e fotogramétricos e à grande quantidade de mapas impressos existentes.

O método mais comum atualmente utilizado para a aquisição dos dados é por meio da digitalização manual de mapas.

Conforme BURROUGH (1986), um digitalizador é um dispositivo eletrônico ou eletromagnético consistindo de uma mesa sobre a qual pode ser colocado o mapa ou documento. As coordenadas de um ponto sobre a superfície do digitalizador são enviadas para

o computador por meio de um cursor, que consiste de uma bobina encaixada num plástico, com um visor locado acuradamente com os fios cruzados.

A função principal do digitalizador é introduzir rápida e acuradamente as coordenadas dos pontos e linhas de contorno. Para a digitalização de curvas de nível são armazenadas as coordenadas (x,y) dos pontos de cada curva e a coordenada z, por ser constante ao longo da mesma, é armazenada uma única vez. Segundo TULADHAR e MAKAROVIC (1984), a maior desvantagem da digitalização manual reside na tarefa demorada e tediosa, reduzindo a performance e produtividade do operador.

Para WEIBEL e HELLER (1991), apesar do uso difundido das curvas de nível como base para os DEM's, estas apresentam alguns problemas. As curvas de nível são uma forma de visualização do terreno e não são muito úteis como um esquema para a representação numérica da superfície. Isto porque um número excessivo de pontos é amostrado ao longo das curvas (super-amostragem), enquanto que nenhum ponto é amostrado entre as curvas (sub-amostragem).

Segundo GAO (1975), se por um lado os DEM's gerados pelo método fotogramétrico são eficientes e acurados, tal método necessita equipamentos sofisticados e caros, e operadores altamente treinados. Por outro lado, a geração de DEM's a partir de curvas de nível não é limitada por tais restrições.

2.3 GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ALTITUDE

A coleta de dados gera um conjunto de observações relativamente desordenado, que não permite a aplicação imediata para a formação do DEM.

Para WEIBEL e HELLER (1991), estes dados devem ser processados e em seguida deve ser utilizado um modelo de interpolação para aproximar o comportamento da superfície.

2.3.1 Estruturas de dados para Modelos Digitais de Altitude

Conforme WEIBEL e HELLER (1991), os dados coletados devem ser estruturados para manipulação das operações de modelagem do terreno. Durante algum tempo, várias estruturas de dados para DEM foram utilizadas, porém atualmente, são usadas o grid regular ou matriz de altitudes e a Rede Irregular Triangulada (Triangular Irregular Network - TIN) .

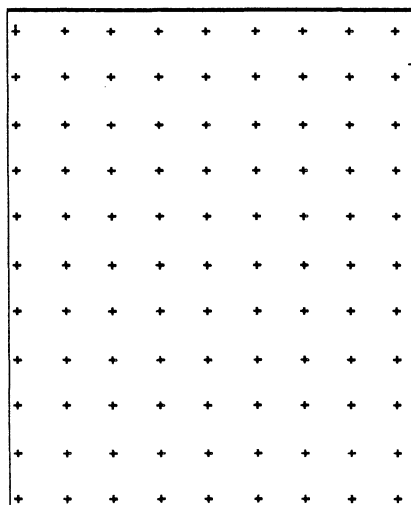
2.3.1.1 Matriz de altitudes

Uma matriz de altitudes ou grid regular é a forma mais comum de um DEM, sendo obtida a partir de medições quantitativas em fotografias aéreas estereoscópicas em estereorestituidores. Somente a altitude da superfície de cada ponto amostral é armazenada no

computador como mostrado na figura 2. Segundo PALACIOS-VELEZ e CUEVAS-RENAUD (1986), as coordenadas são determinadas pelo espaçamento do grid e estão implícitas na posição sequencial do valor de altitude dentro da matriz de armazenamento computacional.

Conforme WEIBEL e HELLER (1991), devido à matriz de altitudes ser armazenada como uma matriz bi-dimensional, sua manipulação é simples e os algoritmos de modelagem do terreno são quase diretos.

Figura 2 - Matriz de altitudes ou grid regular



Fonte : WEIBEL e HELLER (1991, p.274)

Para BURROUGH (1986), embora as matrizes de altitudes sejam úteis para o cálculo de curvas de nível, ângulos de declividade e aspecto, sombreamento e delineamento automático de bacias, estas possuem algumas desvantagens, como por exemplo a grande quantidade de dados redundantes em áreas de terreno uniforme. Segundo PALACIOS-VELEZ e CUEVAS-RENAUD (1986), esta redundância comporta-se como “ruído” que torna mais

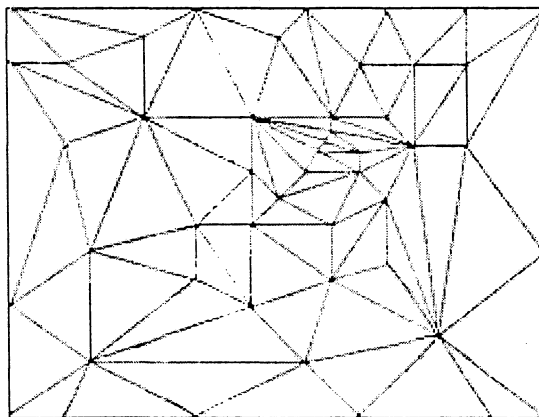
difícil a extração de informação de cursos de rios e cristas. Além disso as matrizes de altitude não permitem adaptar as áreas de relevos de diferentes complexidade sem a mudança do tamanho do grid.

2.3.1.2 Rede Irregular Triangulada

Conforme BURROUGH (1986), a Rede Irregular Triangulada é um sistema projetado por Peucker e seus colaboradores (1978) para modelagem digital de altitude que evita as redundâncias da matriz de altitudes e que ao mesmo tempo também pode ser mais eficiente para muitos tipos de cálculos (como declividade) do que sistemas que são baseados em curvas de nível digitalizadas.

Ainda segundo o autor, uma TIN é um modelo de terreno que usa uma folha de faces triangulares conectadas e contínuas baseadas na triangulação de Delaunay de pontos de observação ou nós irregularmente espaçados, como mostrado na figura 3.

Figura 3 - Rede Irregular Triangulada (TIN)



Fonte : BURROUGH (1986, p.42)

Conforme PEUCKER et al (1978), o método para representar o modelo TIN baseia-se apenas nos triângulos. Cada triângulo necessita de seis ponteiros para sua definição: três para os nós e seus vértices e três para os triângulos vizinhos. Os nós são considerados como entidades primárias na base de dados.

Para BURROUGH (1986), ao contrário das matrizes de altitudes, as TIN's permitem que seja coletada informação extra em áreas de relevo complexo, sem a necessidade de que enormes quantidades de dados sejam coletadas para as áreas de relevo simples. As feições estruturais podem ser incorporadas aos dados, para aumentar a acuracidade. Segundo WEIBEL e HELLER (1991), as TIN's necessitam de poucos pontos para representar um DEM com boa acuracidade.

Segundo BURROUGH (1986), PEUCKER (1978) demonstrou que a estrutura TIN pode ser construída a partir de dados capturados por digitalização manual ou a partir de seleção automática de pontos e triangulação de dados raster obtidos por equipamentos automatizados de ortofotos. A estrutura TIN pode ser usada para gerar mapas de declividade, mapas mostrando o relevo sombreado, mapas de curvas de nível, perfis, horizontes, diagramas de blocos e mapas de linhas de visada.

2.3.1.3 Comparação entre matrizes de altitudes e TIN

Segundo KUMLER (1994), a natureza irregular da TIN possui muitas vantagens e desvantagens. A vantagem principal é a resolução variável: uma TIN pode incluir

muitos pontos onde a superfície é acidentada e muda rapidamente, mas ao mesmo tempo poucos pontos em áreas onde a superfície é relativamente uniforme.

Outra vantagem significativa é a capacidade para incluir pontos importantes da superfície - depressões, cumes, interseções de estradas, rios, pontos ao longo de rios, entre outros - nas suas localizações exatas (para a precisão do armazenamento das coordenadas).

Para KUMLER (1994), estas vantagens são contrabalançadas pela complexidade no armazenamento e manipulação. A localização de cada ponto na TIN deve ser especificada nas dimensões x, y e z, mas na estrutura gridada a localização horizontal está implícita na natureza do grid.

Vários estudos realizados, fizeram análises entre os grids regulares e TINs, visando compará-los em termos de eficiência e resultados. KUMLER (1994) afirma que para MARK (1975) o modelo triangular é mais acurado para estimar declividades e altitudes locais, porém a custo de uma estrutura de dados que necessita de três vezes mais espaço de armazenamento em relação à estrutura grid.

Um estudo realizado por KUMLER (1994) investigou vários procedimentos para criar TINs a partir de curvas de nível do USGS (United States Geological Survey) Digital Line Graphs (DLGS) e a partir de grids regulares. Este estudo indicou que os modelos com estrutura TIN foram significativamente superiores aos grids regulares. Entretanto, um novo estudo realizado pelo mesmo autor, em uma área dos Estados Unidos, detectou que a precisão das TIN's são comparativamente menores em relação às grades regulares.

De acordo com WEIBEL e HELLER (1991), é importante observar que nenhuma estrutura é superior para todas as tarefas de modelagem digital de terreno. Portanto,

um sistema de DEM deve ser flexível, tendo a capacidade de alternar entre as diferentes estruturas, modificar e refinar o DEM.

2.3.2 Interpolação dos dados

Segundo WEIBEL e HELLER (1991), na modelagem digital de terreno a interpolação tem o objetivo de estimar altitudes em regiões onde não existem dados. A interpolação é utilizada principalmente para:

- a) cálculo de altitudes (z) para localizações pontuais simples;
- b) cálculo de altitudes (z) para um grid particular a partir dos pontos amostrados originalmente;
- c) cálculo de localizações (x,y) de pontos ao longo de curvas de nível;
- d) reamostragem de grids retangulares.

Ainda conforme esses autores, deve-se considerar que a escolha do método de interpolação juntamente com o processo de amostragem determinam a qualidade do DEM resultante. Além disto, não se pode afirmar que um dado algoritmo é superior aos demais, ou seja apropriado a todas as aplicações. Finalmente, a escolha de um método de interpolação deverá considerar o grau de acuracidade desejada e o esforço computacional envolvido.

A literatura apresenta um grande número de métodos de interpolação. Neste trabalho porém, serão abordados apenas aqueles que serão utilizados efetivamente no desenvolvimento do mesmo.

2.3.2.1 Métodos de interpolação

De acordo com YAMAMOTO (1986), as funções de interpolação podem ser divididas em funções globais e locais. Segundo YAMAMOTO (1986), FRANKE (1982) afirma que a função global é dependente de todos os pontos amostrados e a adição ou retirada de um deles, ou a mudança de uma das suas coordenadas irá propagar-se através do domínio de definição da função. Como exemplos de funções globais pode-se citar as funções polinomiais e equações multiquádricas.

Para YAMAMOTO (1986) as funções locais são definidas para pequenas porções do mapa, sendo aplicadas sucessivamente até cobrir toda a área do mesmo. O mesmo autor afirma que para FRANKE (1982) a alteração de um ponto amostral afetará somente os pontos próximos do mesmo, dentro de alguma distância dada. As funções locais mais importantes são: ponderação pelo inverso da distância e interpolação em redes triangularizadas.

2.3.2.1.1 Ponderação pelo inverso da distância

Segundo EKLUNDH e MÄRTENSSON (1995), neste método cada célula da superfície resultante é interpolada pela média dos valores de um conjunto de pontos vizinhos. A cada ponto é dado um peso na proporção inversa à distância entre o ponto e a célula, tendo assim os pontos mais próximos da célula maior importância. O número de pontos a serem incluídos na média pode variar, mas normalmente fica entre 4 e 12.

Este método foi originalmente proposto por Shepard (1968) cuja fórmula geral

é:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n F_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$\text{com : } W_i = \frac{1}{D_i^P} \quad (2)$$

$$\text{e } D_i^P = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2} \quad (3)$$

onde: F = valor interpolado;

F_i = valor observado no ponto i;

W_i = ponderador;

D_i = distância entre o ponto i e o ponto a ser interpolado;

P = potência da distância;

n = número de pontos dentro da vizinhança a ser interpolada.

Quando o ponto interpolado coincidir com algum ponto observado i, faz-se $F=F_i$, o que causa o surgimento de áreas planas ao redor de cada ponto de controle, devido ao fato das derivadas parciais de primeira ordem serem nulas em cada ponto amostral.

Segundo YAMAMOTO (1986), SHEPARD (1968) sugere que sejam incluídas informações a respeito das derivadas na equação (3) para evitar o surgimento das áreas planas. Assim, a interpolação é feita em dois estágios. No primeiro estágio são calculadas as projeções dos mergulhos ou inclinações das superfícies que passam pelos pontos amostrais. No segundo estágio é calculada a média das projeções ponderadas pelo inverso da distância, como sendo o valor interpolado.

2.3.2.1.3 Interpolação em redes triangularizadas

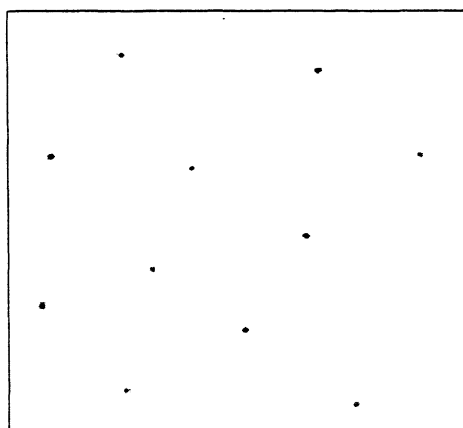
Os procedimentos de interpolação local mais usados são baseados na triangulação, onde a interpolação é conseguida por polinômios que se ajustam localmente aos triângulos. Para WEIBEL e HELLER (1991), a triangulação também é usada para construir DEM's TIN. Logo, a triangulação serve como uma base para as estruturas TIN e como uma base para a interpolação.

Existem muitas formas de triangular um conjunto de pontos, mas a mais aceita é a triangulação de Delaunay. Segundo WEIBEL e HELLER (1991), uma triangulação de um conjunto de pontos é uma triangulação de Delaunay se e somente se, o círculo circunscrito a qualquer de seus triângulos não contém qualquer outro ponto em seu interior. Por exemplo, seja o conjunto de pontos da figura 4. Podem ser traçados a partir deste conjunto vários triângulos. Se o círculo circunscrito a cada um destes triângulos não contiver nenhum outro ponto do conjunto, então o triângulo será considerado um triângulo de Delaunay. A figura 5a mostra um exemplo de um triângulo de Delaunay para o conjunto da figura 4, e na figura 5b tem-se um triângulo que não é triângulo de Delaunay por possuir outro ponto no interior de seu círculo circunscrito.

Segundo YAMAMOTO (1986), a triangulação de Delaunay tem origem na Divisão de Dirichlet (ou diagrama de Voronoi), onde em torno de cada ponto é construído um polígono convexo, de modo que dois polígonos contíguos possuem em comum uma única aresta, equidistante dos pontos internos aos polígonos. A triangulação é obtida unindo estes pontos. Os nós do polígono de Voronoi são coincidentes com os circuncentros dos triângulos de Delaunay. Os Bissetores perpendiculares às arestas dos triângulos de Delaunay formam as

arestas dos polígonos de Voronoi. Como são duais, a triangulação de Delaunay pode ser construída a partir de seu diagrama e vice-versa.

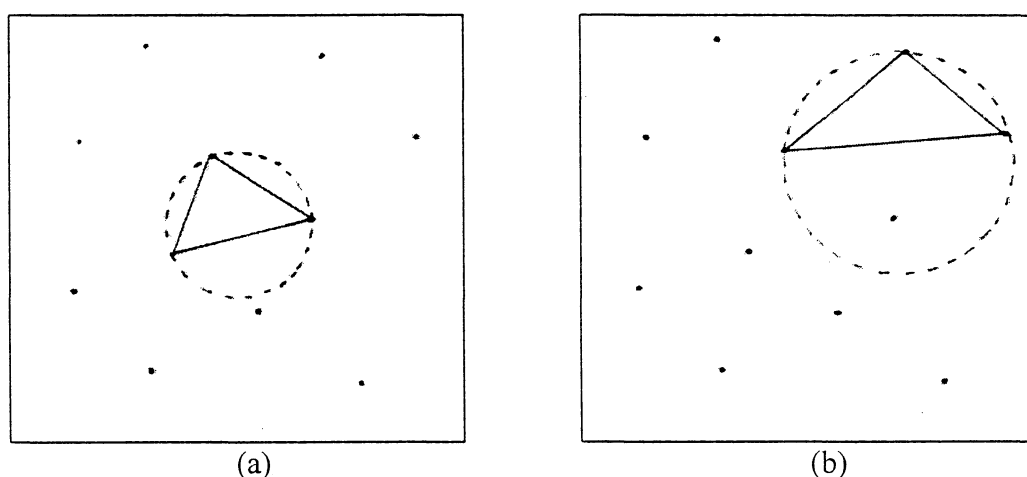
Figura 4 - Conjunto de pontos amostrais para triangulação



Adaptado de Fernandes (1988)

Considerando o mesmo conjunto de pontos da figura 4, o diagrama de Voronoi é construído encontrando-se as bissetrizes das linhas que unem os pontos amostrais, e ligando as interseções encontradas. Na figura 6a está representado apenas um dos polígonos convexos para este conjunto de pontos, e na figura 6b a divisão de Dirichlet para todo o conjunto.

Figura 5 - Triângulos de Delaunay



(a) Triângulo de Delaunay com círculo circunscrito; (b) Triângulo traçado a partir do conjunto de pontos da figura 4. Note-se que o círculo circunscrito contém outro ponto em seu interior, não sendo considerado como triângulo de Delaunay.

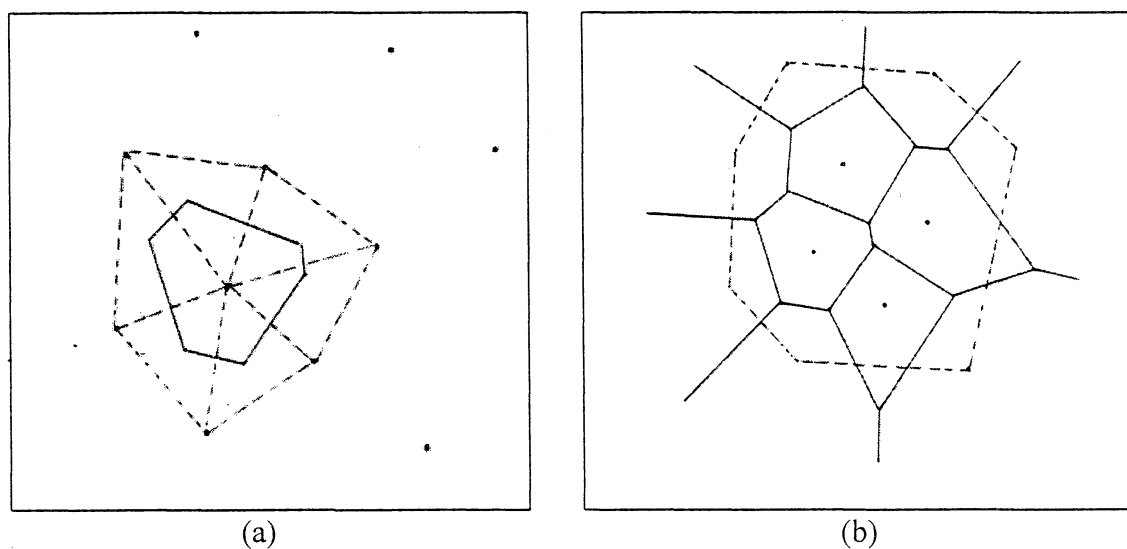
Fonte: Fernandes (1988, p.50)

Na figura 7 tem-se a triangulação de Delaunay, juntamente com os polígonos de Voronoi. Traçando o círculo circunscrito de um destes triângulos pode-se notar que o nó do polígono de Voronoi é coincidente com o circuncentro do círculo circunscrito ao triângulo de Delaunay.

Se a TIN foi construída no processo de triangulação pode ser usada como um DEM TIN ou então como uma base para a interpolação. Segundo WEIBEL e HELLER (1991), na interpolação baseada em TIN o valor de z (interpolado) de um ponto depende das alturas dos nós do triângulo que o contém. O valor de z é interpolado pela substituição dos valores x, y do ponto por uma função polinomial que se ajusta ao triângulo relativo. Conforme

YAMAMOTO (1986), se a interpolação linear é usada, o valor de z pode ser computado diretamente das altitudes dos vértices.

Figura 6 - Diagrama de Voronoi



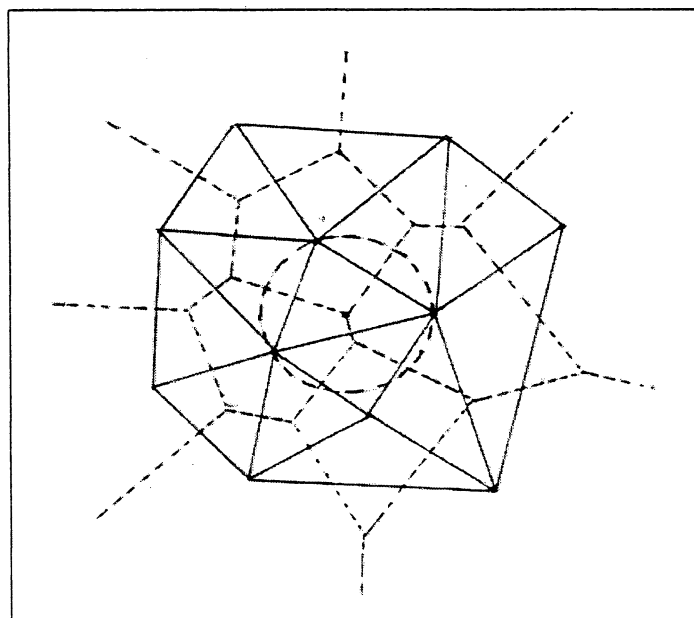
(a) Polígono de Voronoi. As linhas tracejadas unem os pontos amostrais. Os lados dos polígonos interceptam estas linhas nas suas bissetrizes.; (b) Divisão de Dirichlet para todo o conjunto de pontos

Adaptado de Fernandes (1988)

Para WEIBEL e HELLER (1991), a principal vantagem da interpolação baseada em TIN é que é muito eficiente. Além disto, desde que a TIN tenha sido construída, os DEM's gridados ou curva de nível podem ser eficientemente computados, visto que a TIN proporciona um meio conveniente de localização de vértices relevantes para a interpolação. Ainda como vantagens da interpolação baseada em TIN pode-se citar a conversão de

estruturas de dados (transformação de qualquer TIN em um DEM grid) e que é um método local que permite que descontinuidades sejam incorporadas facilmente.

Figura 7 - Triangulação de Delaunay e polígonos de Voronoi



A Triangulação de Delaunay é mostrada pelas linhas cheias e os polígonos de Voronoi pelas linhas tracejadas. O centro do círculo circunscrito é coincidente com o nó do polígono de

Voronoi

Adaptado de Fernandes (1988)

3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

3.1 INTRODUÇÃO

O programa SKEL, utilizado no desenvolvimento do trabalho para realizar a extração da rede de drenagem, possui em seu algoritmo alguns conceitos relacionados ao Processamento Digital de Imagens, principalmente no que diz respeito à conectividade e afinamento de objetos. Desse modo, neste capítulo serão abordados estes conceitos para proporcionar melhor entendimento do assunto.

Segundo PRATT (1978), a análise de imagens está interessada na extração de medidas úteis, dados ou informação a partir de uma imagem, por meio de sistemas e dispositivos automáticos ou semi-automáticos. Na literatura este campo tem sido chamado de extração de dados da imagem, análise de cenas, descrição da imagem, interpretação automática de fotos, e vários outros termos.

Para ROSENFELD e KAK (1982), o processamento de imagens está preocupado com a manipulação e análise de figuras por um computador. Suas sub-áreas principais incluem:

- a) Digitalização e compressão: conversão de figuras para forma discreta;
- b) Realce, restauração e reconstrução: melhora de figuras degradadas (baixo contraste, ruídos);

c) “Matching”, descrição e reconhecimento: registrar figuras e compará-las a uma outra; segmentar figuras em partes, medindo propriedades e relações entre as partes, e comparando resultados de descrições a modelos que definem classes de figuras.

Segundo MYLER e WEEKS (1993), normalmente o objetivo final do processamento de imagens é segmentar objetos dentro de uma imagem para reconhecimento e identificação dos mesmos. Os passos de processamento de imagens necessários para reconhecimento de padrões e identificação geralmente incluem filtragem espacial para remover ruídos, escolha de um limiar para produzir uma imagem binária em tons de cinza, e então filtragem morfológica da imagem para decomposição geométrica da forma.

Ainda conforme esses autores, os filtros morfológicos operam em objetos dentro de uma imagem pela manipulação das suas formas geométricas. O objetivo destes filtros é suavizar os contornos dos objetos e decompor a imagem em suas formas geométricas fundamentais. As operações morfológicas podem ser separadas em duas categorias: (a) filtros morfológicos de imagens binárias, e (b) filtros morfológicos de imagens em tons de cinza.

Quatro tipos básicos de operações de filtragem morfológicas binárias são disponíveis: erosão, dilatação, abertura e fechamento. Cada um destes filtros usa uma máscara ou conjunto de estruturas para os processos de filtragem geométrica. Os filtros de erosão reduzem o tamanho geométrico do objeto, enquanto os filtros de dilatação aumentam o tamanho do mesmo. Duas outras operações de filtragem morfológicas incluem os filtros de abertura e fechamento. Um filtro de abertura consiste em um filtro de erosão seguido por um filtro de dilatação, e um filtro de fechamento é um filtro de dilatação seguido por um filtro de erosão. Duas outras importantes operações morfológicas são a detecção de bordas e

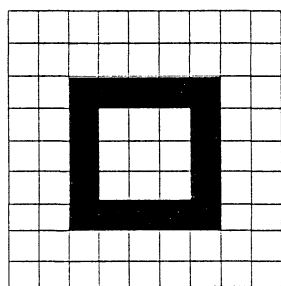
esqueletização. A primeira é usada para achar os contornos dos objetos, enquanto a esqueletização é usada para achar o eixo médio de transformação ou esqueleto de um objeto.

Para fornecer uma visão geral do assunto, este capítulo aborda os aspectos básicos da esqueletização de imagens, iniciando com o conceito de conectividade.

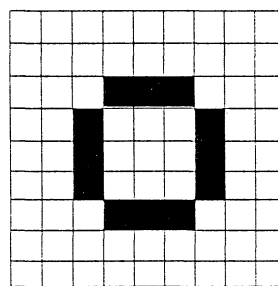
3.2 CONECTIVIDADE

Segundo PRATT (1978), um passo fundamental na formação de uma descrição simbólica de uma figura a partir de um conjunto de pixels ou uma coleção de feições primitivas é especificar as relações geométricas ou conectividade dos pixels que podem pertencer à mesma classe. Na figura 8a, o anel de pixels pretos, divide a figura em três regiões: os pixels brancos externos ao anel, os pixels brancos internos ao anel e os pixels pretos pertencentes ao anel. Os pixels dentro de cada região são ditos serem conectados uns aos outros. Este conceito de conectividade é facilmente entendido para a Figura 8a, mas surgem ambigüidades quando considera-se a Figura 8b. Os pixels pretos ainda definem um anel, ou representam quatro segmentos de linhas retas? A resposta a esta questão não é absoluta, mas sujeita à definição de conectividade.

Figura 8 - Ilustrações de conectividade



(a) figura em forma de anel



(b) figura ambígua

Fonte: PRATT (1978, p. 515)

Retornando ao caso mais geral de imagens em tom de cinza, considere-se a Figura 9a, na qual um pixel (pixel A) está cercado por oito vizinhos (pixels B a I). Conforme PRATT (1978), assume-se que o pixel A pertence a um conjunto de propriedades S, ou seja, alguns elementos descritores foram estabelecidos baseados em seu brilho, cor, textura, etc. Pela definição de conectividade quatro os pixels A e B são conectados se ambos pertencem às propriedades de S. Similarmente, a conectividade quatro pode ser estabelecida entre o pixel A e pixels C, D e E que compartilham a borda. A conectividade oito autoriza o pixel A e um de seus vizinhos diagonais serem conectados se ambos pertencerem a conjuntos de propriedades idênticos. A definição dada por GONZALEZ e WINTZ (1977) complementa esta idéia. Conforme estes autores, os quatro vizinhos conectados de um ponto são os quatro vizinhos não diagonalmente adjacentes. Os oito vizinhos conectados são os oito pontos vizinhos que cercam o ponto em questão.

Para PRATT (1978), sob a definição de conectividade quatro, a figura 8b contém quatro segmentos de linhas desconectados, mas com a definição de conectividade oito

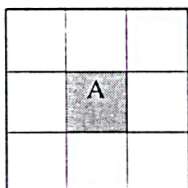
esta mesma figura contém um anel de pixels pretos conectados. Entretanto, sob a conectividade oito, os elementos brancos do interior do anel da figura 8b são conectados aos elementos brancos do exterior. Assim, existe um paradoxo. Se os pixels pretos estão oito-conectados em um anel, pode-se esperar uma divisão entre os pixels brancos internos e externos. Para eliminar este dilema, a conectividade oito pode ser definida para os pixels do conjunto de propriedades S , e a conectividade quatro para os pixels de propriedade \bar{S} , (com \bar{S} sendo o complemento do conjunto S) ou vice-versa.

De acordo com PRATT (1978), na figura 9 os pixels sombreados são membros do conjunto S e os não-sombrados, pertencem a \bar{S} . Assim, o pixel A da figura 9b é chamado isolado visto que não é oito-conectado a nenhum de seus vizinhos. Na figura 9c, o pixel A é um pixel interior, pois é quatro-conectado a cada um dos vizinhos B, C, D e E. Um pixel da borda, como mostrado na figura 9d não é quatro-conectado a no mínimo um de seus vizinhos. A figura 9e ilustra a definição de um ponto arco, onde o pixel A é quatro-conectado a somente um de seus vizinhos superior ou inferior (ou da direita ou esquerda). Um pixel de fim de arco é quatro-conectado a somente um vizinho.

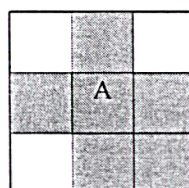
Figura 9 - Definições de pixels conectados

(a) localizações dos pixels

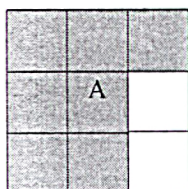
G	C	F
D	A	B
H	E	I



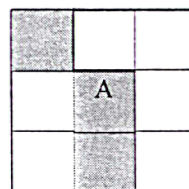
(b) pixel isolado



(c) pixel interior



(d) pixel de borda



(e) pixel de arco

Fonte: PRATT (1978, p.515)

3.3 AFINAMENTO

Conforme MYLER e WEEKS (1993), o objetivo de muitas aplicações de processamento de imagens é classificar objetos desconhecidos dentro de uma imagem. Usar todos os pixels dentro de um objeto para o processo de identificação acarreta em um aumento enorme de complexidade para o processo de identificação. Uma solução para decompor um objeto em um conjunto único de características é achar o seu esqueleto. O esqueleto de um

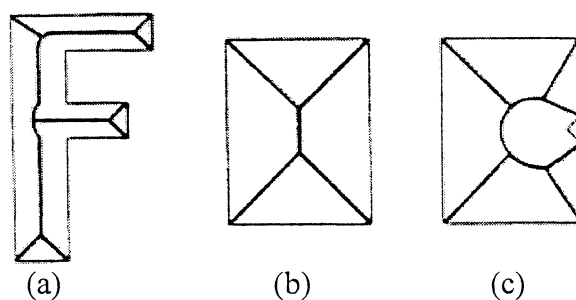
objeto representa uma forma geométrica que é unicamente definida pela forma original do objeto. Conforme SUDHALKAR et al. (1996), pode-se imaginar que a figura ou objeto é formado de unidades quadradas (pixels). O problema é deletar estes pixels de modo que o objeto seja afinado, tornando-se uma abstração do original. O critério para deletar os pixels inclui a manutenção de suas propriedades topológicas, de modo que buracos ou vazios não sejam criados ou deletados.

Em um conceito matemático, dado por PAVLIDIS (1987), o afinamento é definido da seguinte maneira: "Seja R um plano, B seu limite e P um ponto em R . Um vizinho mais próximo de P em B é o ponto M , tal que não há outro ponto em B cuja distância a partir de P é menor que a distância PM . Se P tem mais de um vizinho mais próximo, então é dito ser um ponto esquelético de R . A união de todos os pontos esqueléticos é chamado de esqueleto ou eixo médio de R ." (PAVLIDIS, 1987, p. 195).

Na figura 10 estão alguns exemplos de esqueletos com suas respectivas feições originais. Pode-se notar que os esqueletos são muito sensíveis a ruídos, visto que um pequeno distúrbio na borda não somente causa um distúrbio em um ramo do esqueleto, mas também pode gerar novos ramos.

Conforme PAVLIDIS, outra observação que pode ser feita a partir desta figura é que para objetos delgados, os esqueletos fornecem informação substancial sobre sua forma. Isto não ocorre no caso de objetos compactos, como o da figura 10b.

Figura 10 - Exemplos de esqueletos



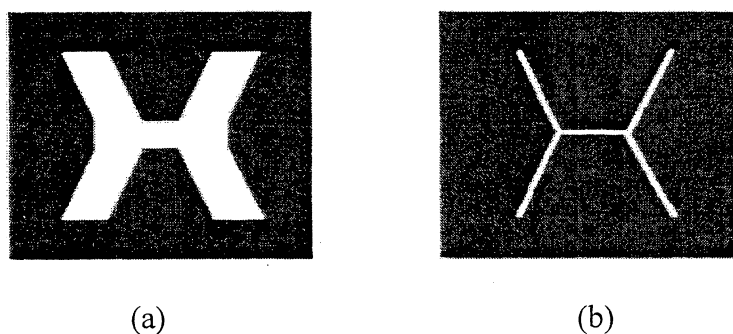
- a) a estrutura linear da silhueta corresponde ao eixo médio; b) não existe correspondência simples entre os braços do esqueleto e o objeto original; c) pequenos ruídos alteram drasticamente a forma do esqueleto

Fonte: PAVLIDIS (1987, p.197)

Segundo SUDHALKAR et al. (1996), nos anos 60, BLUM propôs um método para transformar objetos em esqueletos ou eixos médios, sendo chamado de “campo em fogo”. Para Blum, o objeto em questão seria um pedaço de grama, cuja borda está em chamas. Assim, o fogo irá se propagar até o interior deste pedaço de grama a uma velocidade uniforme. Os pontos nos quais as linhas de fogo se cruzam e então extinguem-se são conhecidas como eixos médios do objeto.

A figura 11a mostra a imagem de um símbolo X e a figura 11b mostra a transformação do eixo médio. Nota-se que muito menos informação (número de pixels) é necessária para descrever o eixo médio de seu objeto comparado a sua forma original.

Figura 11- Exemplo do afinamento de um objeto

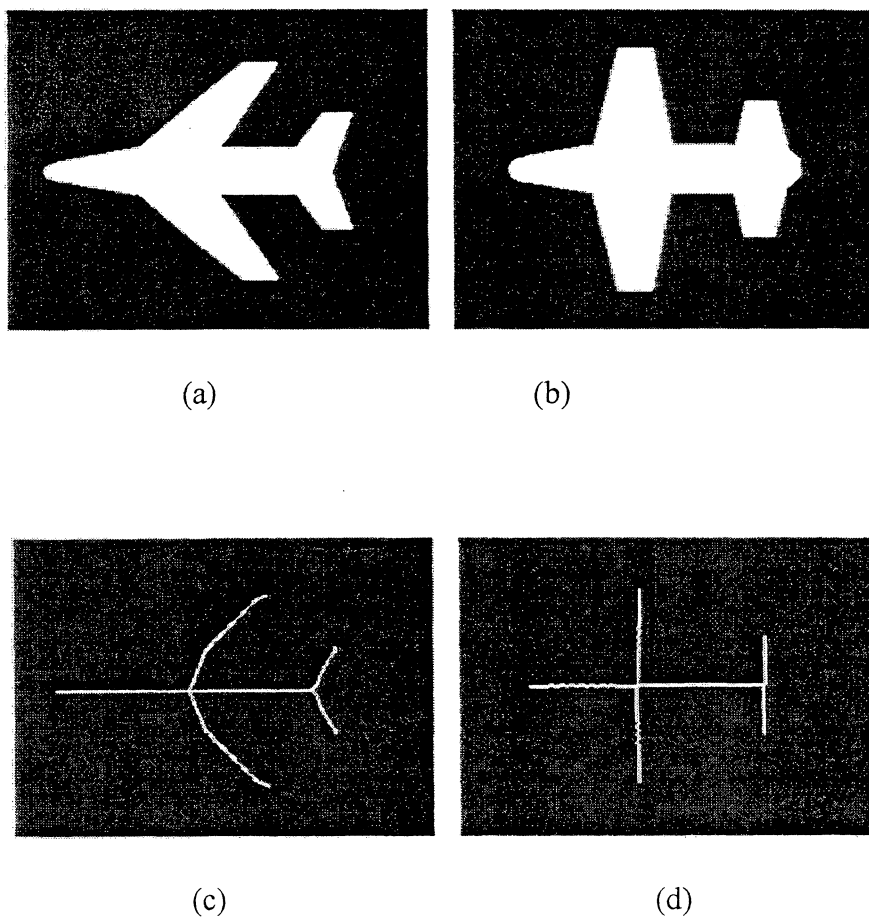


Fonte: MYLER e WEEKS (p. 130, 1993)

A figura 12 mostra a efetividade de usar esqueletos para identificação da silhueta de aviões. As figuras 12a e 12b mostram duas silhuetas de aviões diferentes e as figuras 12c e 12d mostram seus respectivos esqueletos. Pode-se notar a diferença entre os dois esqueletos, em particular, o ângulo entre o cruzamento da asa com o corpo do avião.

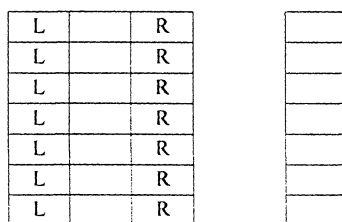
PRATT (1978) ilustra a operação de um algoritmo de afinamento simples, mostrada na figura 13a, para um objeto de forma retangular. No primeiro passo do primeiro estágio do algoritmo, os pixels da borda do lado esquerdo, denotados por L, serão removidos se não forem pontos arco e se sua remoção não destruir a conectividade oito. No segundo passo, os pixels da borda do lado direito do objeto, indicados por R, serão removidos sob as mesmas condições. O processo de remoção ocorre então para os pixels do topo (T) e de baixo (B), que serão removido se não forem pontos arco e se sua remoção não afetar a conectividade oito. Depois destes quatro passos do primeiro estágio, o algoritmo é repetido até que mais nenhum pixel possa ser removido sem afetar a continuidade. As figuras 13b e 13c ilustram a operação deste algoritmo aplicado a uma região de forma irregular orientada vertical e horizontalmente. Os resultados são diferentes devido à ordem seqüencial dos passos.

Figura 12 - Exemplo do afinamento aplicado à silhueta de aviões

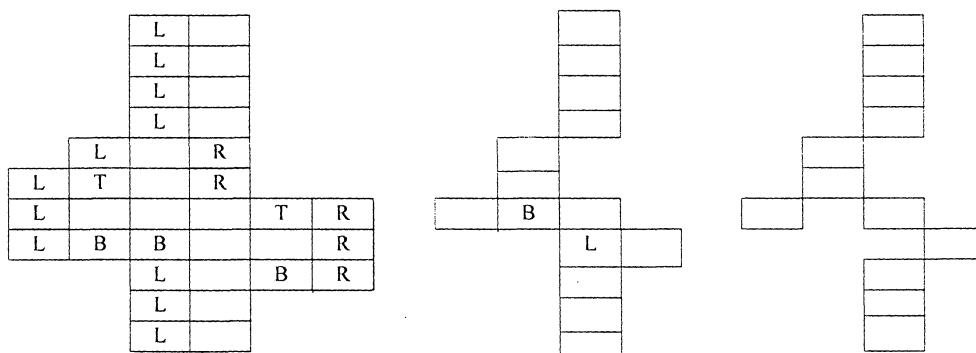


Fonte: MYLER E WEEKS (p.135, 1993)

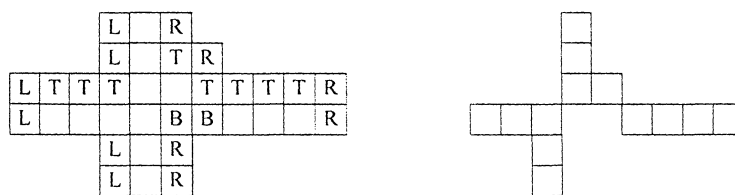
Figura 13 - Exemplos do algoritmo de afinamento



a) afinamento de uma figura retangular



b) afinamento de uma região vertical



c) afinamento de uma região horizontal

Fonte: PRATT (1978, p.518)

Segundo REDDY e TURKIYYAH (1995), o esqueleto possui algumas características interessantes que são importantes em muitas aplicações de engenharia. Estas características são as seguintes:

- a) unicidade: há um único esqueleto para um dado objeto;
- b) inversibilidade: dado um esqueleto, seu objeto correspondente pode ser reconstruído;
- c) redução dimensional: a dimensionabilidade de um esqueleto é menor que a do seu objeto, e
- d) equivalência topológica: um esqueleto é topologicamente equivalente a seu objeto.

4 EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DRENAGEM

4.1 INTRODUÇÃO

As redes de drenagem são elementos fundamentais nas Ciências da Terra, sendo uma componente essencial para modelos hidrológicos e planos de gerenciamento de recursos.

Segundo CHOROWICZ et al. (1992), as redes de drenagem são obtidas por observações de campo, fotointerpretação ou extração direta a partir de mapas topográficos, ou indiretamente por meio das curvas de nível. COLLINS, em 1975 já vislumbrava a possibilidade do uso dos DEM's para a extração de elementos referentes à hidrologia. Mais recentemente as técnicas de extração evoluíram dos métodos manuais para os assistidos por computador e finalmente para os automáticos, tendo como dados de entrada as informações de altitude.

Segundo DYMOND e HARMSWORTH (1994), após a extração, as redes de drenagem podem ser usadas para calcular áreas de bacias hidrográficas, além de outros índices hidrológicos, como distância entre cursos de água, descarga da bacia, fluxo, entre outros.

Devido ao crescente aumento da disponibilidade da informação topográfica na forma digital, torna-se claro que os estudos de redes de drenagem podem ser auxiliados se o processamento puder ser realizado diretamente a partir dos DEM's.

Vários algoritmos para a extração das redes de drenagem têm sido desenvolvidos. O algoritmo que será utilizado neste trabalho, chamado SKEL, utiliza um

DEM no formato de imagem, ou seja, após a geração do DEM o mesmo deve ser transformado em uma imagem, na qual os níveis de cinza representam as altitudes. Desse modo, o algoritmo extrai a rede de drenagem baseado em conceitos de processamento de imagens, particularmente de afinamento de objetos.

Com este capítulo tem-se por objetivo rever brevemente os métodos utilizados para a extração da drenagem, detalhando-se aquele que será utilizado neste trabalho.

4.2 ABORDAGENS PARA O RECONHECIMENTO AUTOMÁTICO DAS REDES DE DRENAGEM

Segundo TRIIBE (1992) existem três abordagens para o reconhecimento automático de redes de drenagem:

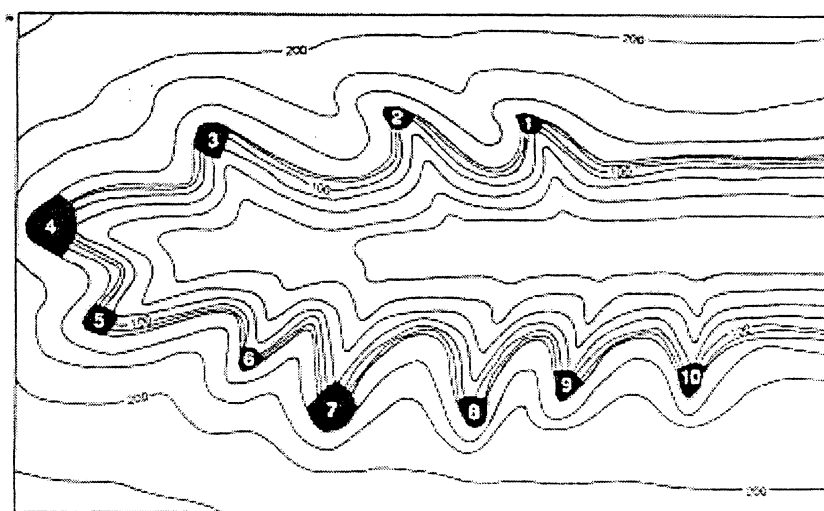
- a) o reconhecimento de pixels individuais do DEM como sendo pertencentes a um vale, utilizando as informações da vizinhança e aplicando o conceito “mais alto que”;
- b) a indicação das direções de drenagens para cada pixel do DEM e o uso desta informação para extrair a rede de drenagem;
- c) métodos mais complexos baseados na abordagem (a) e freqüentemente combinados com a abordagem (b).

4.2.1 Reconhecimento de pixels do DEM como pixels da drenagem usando o conceito “mais alto que”

Este método identifica pixels individuais do DEM como sendo pertencentes a um vale, comparando as altitudes de cada um dos pixels à altitude dos seus vizinhos. Segundo TRIBE (1992), JOHNSTON e ROSENFELD (1975) desenvolveram um método que compara as altitudes dos vizinhos norte e sul com a do pixel. Se ambos os vizinhos são mais altos que o pixel, existe uma perfil em forma de “V” na direção norte-sul. Os vizinhos leste e oeste do pixel são também comparados para encontrar um perfil em forma de “V” nesta direção. Se um destes perfis possui a forma de “V”, o pixel é classificado como pertencente ao vale.

Segundo MARTZ e GARBRECHT (1992), a restrição mais séria a esta abordagem é que gera somente segmentos descontínuos da rede de drenagem, que devem ser conectados subsequente, sendo que podem necessitar de cortes e afinamentos para produzir um padrão aceitável. Estes problemas podem ser mais pronunciados em áreas de relevo baixo ou topograficamente complexas, podendo limitar a utilidade da técnica. A figura 14 mostra um mapa de curvas de nível de um relevo artificial, onde as áreas em preto são os vales. Na figura 15 está representada a drenagem correspondente, onde os ‘x’ indicam os vales da figura 14.

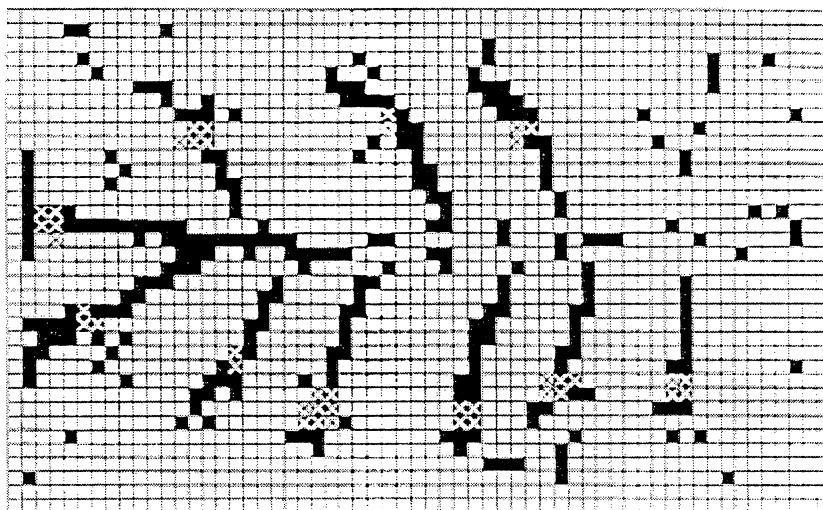
Figura 14 - Mapa de curvas de nível de um relevo artificial



Fonte: TRIBE (1992, p.266)

Nota-se nas figuras 14 e 15 que os vales reconhecidos incluem alguns ruídos, e a maioria dos rios tributários estendem-se além do real, sendo que parte da informação é perdida. Segundo TRIBE (1992) isto acontece devido ao conceito “mais alto que”, onde “mais alto” pode ser somente 1 metro, significando que qualquer pixel representando um buraco pode ser classificado como parte da rede de drenagem.

Figura 15 - Pixels que pertencem ao vale (pretos), reconhecidos no DEM do relevo artificial da figura 14



Fonte: TRIBE (1992, p.266)

4.2.2 Reconhecimento das redes de drenagem usando a informação da direção de drenagem

MARK e O'CALLAGHAN (1984) propuseram um algoritmo baseado no fluxo de água sobre o terreno ao longo de linhas de declividade íngreme, calculando automaticamente a área da bacia de drenagem.

Este algoritmo é implementado em três estágios. No primeiro, as direções de drenagem são indicadas para cada pixel do DEM. Estas são as direções que possuem as declividades mais íngremes a partir de um pixel. Usando a direção de drenagem, é calculado para cada pixel o número total de pixels de contribuição de drenagem. Por fim é escolhido um limiar e todos os pixels que possuem o número de pixels de contribuição maior do que este limiar são incluídos como parte da rede de drenagem.

Segundo TRIBE (1992), deve-se levar em consideração que este método baseia-se em várias suposições. Uma das mais importantes é que a rede de drenagem produzida resulta de um ‘evento de chuva homogêneo espacialmente distribuído em uma área completamente impermeável e sem vegetação’. Obviamente não existem tais áreas. Desse modo, a rede de drenagem obtida por este método é diferente da sua contraparte no campo, o que possui implicações se a rede extraída for utilizada para aplicações como modelamento hidrológico. Outra suposição feita é que toda a rede de drenagem é extraída.

Uma das constatações desse método é que o seu sucesso é altamente dependente do DEM utilizado. As áreas planas produzem linhas de drenagem falsas, embora em áreas de relevo acidentado a rede seja bem representada.

Além disso, esse algoritmo só produzirá uma rede de drenagem contínua se todos os pixels do DEM tiverem a direção de drenagem indicada. Existem três situações nas quais a indicação da direção de drenagem é problemática:

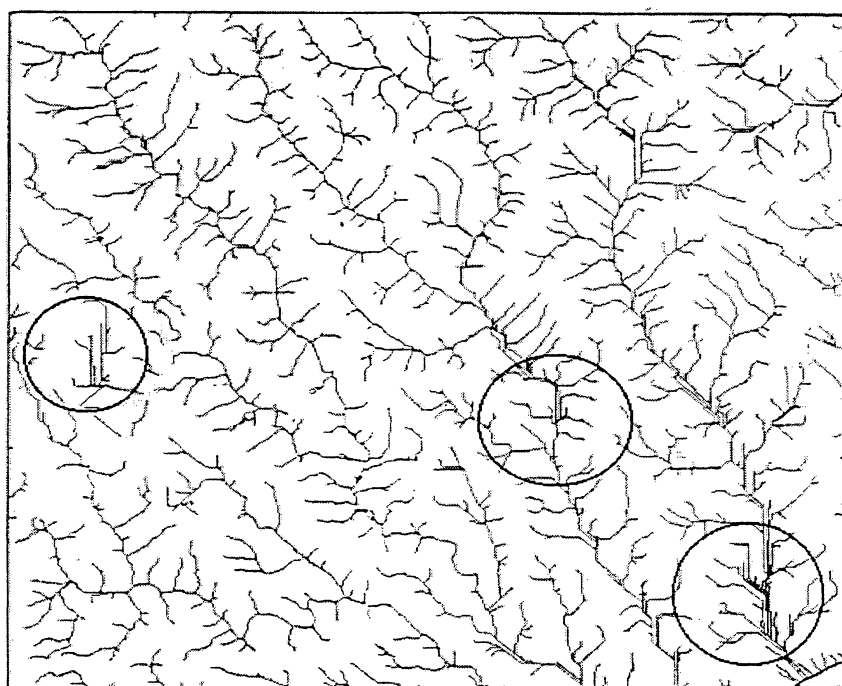
- a) em pixels onde existem duas ou mais possíveis direções de drenagem;
- b) em áreas planas, onde todos os pixels possuem a mesma altitude, e
- c) em ‘pits’ - depressões fechadas no DEM.

Segundo TRIBE (1992), o problema da indicação da direção de drenagem quando há mais de uma possibilidade pode ser resolvido com o método desenvolvido por JENSON e DOMINGUE (1988), onde as direções são iterativamente indicadas em áreas planas, depois que todos os outros pixels do DEM tenham sido processados. Este método porém, provoca linhas de drenagem paralelas, como mostrado na figura 16.

Para MARTZ e GARBRECHT (1992), o maior problema da abordagem de MARK e O’CALLAGHAN é a existência de depressões no DEM. As depressões são pixels

que não possuem vizinhos com altitudes mais baixas e, conseqüentemente, não possuem um canal de drenagem que escoar para um pixel vizinho. Normalmente as depressões ocorrem na maioria dos DEM's raster e são vistas como feições falsas, que originam-se de erros de interpolação durante a geração do DEM e truncam os valores interpolados na saída.

Figura 16 - Rede de drenagem extraída usando o algoritmo de Jenson e Domingue para a indicação das direções de drenagem. Este algoritmo gera linhas paralelas na rede extraída (nos círculos).



Fonte: TRIBE (1992, p.275)

Para McCORMACK et al. (1993), as depressões podem ser formadas também quando o espaçamento do grid é insuficiente para identificar uma feição topográfica ou em

vales onde o gradiente é baixo. Além disso, as depressões podem ser formadas quando o DEM é gerado por interpolação de curvas de nível ou por qualquer outro processo de interpolação.

Vários métodos foram desenvolvidos para tratar as depressões nos DEM's. MARK e O'CALLAGHAN (1994) sugerem o suavizamento a priori do DEM. Este método funciona bem para depressões simples, mas falha nas depressões complexas e em áreas planas, além de reduzir a informação contida no DEM original.

Outros autores, como JENSON e DOMINGUE (1988) e MARTZ e DE JONG (1988) utilizam um método que se baseia no “preenchimento” das depressões no DEM.

Logicamente, existem outras abordagens para este problema, mas que fogem do escopo deste trabalho. Deve-se ressaltar que a seleção do método mais apropriado para tratar as depressões deve considerar a acuracidade e a precisão do DEM a ser analisado.

4.2.3 RECONHECIMENTO DE REDES DE DRENAGEM COMBINANDO AS DUAS ABORDAGENS ANTERIORES

Conforme TRIBE (1992) foi desenvolvido um método que combina o conceito “mais alto que” abordado na seção 4.2.1, com as informações de direção de drenagem. Devido a serem baseados no conceito “mais alto que” estes métodos produzem redes de drenagem que estendem-se além do real e que incluem espaços em branco, representado ruídos. Além disso, por utilizarem a informação da direção de drenagem, surgem os problemas já descritos na seção 4.2.2, tais como depressões e pixels com duas ou mais direções de drenagem

Segundo QIAN et al. (1990), embora todas essas abordagens produzam uma aproximação satisfatória de porções de uma rede de drenagem, não são ainda uma representação adequada das redes de drenagem consideradas como um todo. Para esses autores, as deficiências nestas técnicas são as seguintes:

- a) as redes de drenagem extraídas são quebradas em segmentos desconectados devido aos vazios entre eles serem muito grandes. Isto poderia exceder a capacidade destes algoritmos para estabelecer as ligações entre os segmentos espacialmente separados;
- b) alguns segmentos podem ser erroneamente unidos com outros, mesmo quando separados por uma linha de cume. Técnicas locais não são hábeis para rejeitar estes tipos de classificação errada;
- c) um único segmento extraído pode ter duas declividades opostas, significando que possui duas direções de fluxo ao longo de seu comprimento, e
- d) segmentos de rios podem ser tão espessos que as suas localizações exatas não podem ser determinadas.

4.3 MÉTODO DE EXTRAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM A PARTIR DA ESQUELETIZAÇÃO DE UM DEM

Este método foi desenvolvido por MEISELS et al. (1995), que propuseram um novo algoritmo para a extração da rede de drenagem. O método é composto de um algoritmo principal e alguns procedimentos de pré e pós-processamento. O algoritmo principal delinea a rede de drenagem a partir de um DEM no formato imagem por um processo de esqueletização

em vários níveis. A seguir é realizado um processo de enumeração dos canais de drenagem extraídos, eliminando “loops”. O algoritmo de esqueletização possui somente o parâmetro k_T , que muda o grau de detalhe dos canais de drenagem extraídos. O problema das depressões é resolvido com a suavização dos dados.

Conforme MEISELS et al. (1995) nesse algoritmo a extração da rede de drenagem está baseada nas seguintes suposições:

- a) os canais de drenagem iniciam perto de cumes, em locais de altas curvaturas nas curvas de nível;
- b) os canais de drenagem seguem a direção de máxima declividade até que:
 - b.1) encontram outro canal de drenagem;
 - b.2) associam-se a algum corpo de água que não escoar para outra parte do mapa, e
 - b.3) alcançam a borda do mapa.
- c) os canais de drenagem seguem a direção mais íngreme de declividade em cada ponto.

4.3.1 Extraindo os canais de drenagem por meio da esqueletização em vários níveis

Segundo MEISELS et al. (1995), o algoritmo principal realiza a extração dos canais de drenagem por um processo de esqueletização contínua de “patches” de altitudes constantes. Este algoritmo de esqueletização em níveis é a generalização de um algoritmo de esqueletização de figuras binárias, incluindo a particularidade de trabalhar com as altitudes do DEM. Deve-se ressaltar que o DEM utilizado deve estar no formato imagem, ou seja, os diferentes níveis de altitude são representados por tons de cinza.

O algoritmo inicia nos pixels de altitude máxima e “varre” o mapa nível por nível de altitude. O processo de varredura troca as altitudes dos pixels processados pelo valor zero, chamado de nível de fundo (background). Como um primeiro passo, todos os máximos locais são substituídos pelo valor de fundo, e o processamento continua no nível de altitude abaixo.

De acordo com MEISELS et al. (1995) o algoritmo utiliza dois critérios para extrair os pixels dos canais de drenagem. Um critério relaciona-se à curvatura das curvas de nível. Altas curvaturas indicam a existência de um canal de drenagem. No algoritmo este critério é expresso como uma condição onde um determinado número de pixels com altitude maior está na vizinhança do pixel que está sendo processado.

O outro critério para extrair os pixels do canal de drenagem relaciona-se à conectividade dos mesmos. É uma condição “OU” que permite ao pixel pertencer ao canal de drenagem mesmo se o número de seus vizinhos com valor de fundo é menor do que o parâmetro k_T . Esta condição examina para cada canal de drenagem, o número de vezes que os pixels da vizinhança cruzam o valor de fundo. Se existirem mais do que dois cruzamentos, o pixel está na vizinhança de um canal de drenagem.

O número k_T , que determina o grau de densidade das redes de drenagem, pode estar entre 3 e 6. Quanto menor este valor, a rede extraída será mais densa, e quanto maior este valor, menor a densidade. O valor k_T de cada pixel da curva é estimado pelo número máximo de pixels com valor de fundo entre os oito vizinhos do pixel dado.

No exemplo da figura 17, têm-se 4 possibilidades para uma vizinhança 3 x 3. Os pixels pretos pertencem à altitude que está sendo processada e os pixels brancos às altitudes mais altas, ou seja, com valor de fundo.

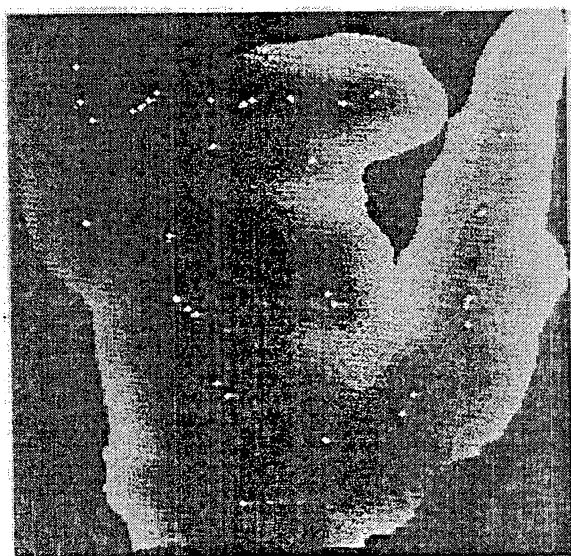
Figura 17 - Valores de k_T para uma vizinhança 3 x 3

●●○	●○○	○○○	○○●
●●○	●●○	○○●	○○○
●●○	○○○	○○○	○○○
$k_T = 3$	$k_T = 4$	$k_T = 5$	$k_T = 6$

Fonte: MEISELS et al. (1992, p.188)

Como resultado deste processo, obtém-se apenas alguns pixels (pontos brancos) pertencentes aos canais de drenagem, como mostrado na figura 18. Estes pixels são extraídos somente com base na curvatura das curvas de nível. O segundo estágio do algoritmo, usa a condição de conectividade para ligar os pontos já extraídos, formando a rede completa. Entretanto, este estágio gera alguns “loops” e pontos finais artificiais, que devem ser subsequenteiramente removidos. O resultado deste estágio é mostrado na figura 19.

Figura 18 - Resultado do primeiro estágio do algoritmo de esqueletização



Fonte: MEISELS et al. (1995, p.190)

Para eliminar os “loops” é utilizado o chamado algoritmo de enumeração da rede de drenagem. Isto é feito selecionando o pixel de escoamento, inicializando um ponteiro mostrando a direção de drenagem e “escalando” recursivamente a rede de drenagem. A rede é percorrida no sentido horário, marcando cada pixel com seu número de ligação, que é incrementado a cada nó.

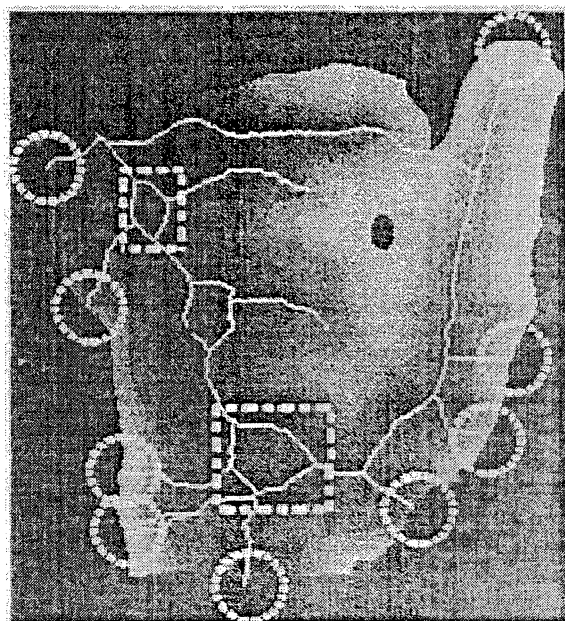
Em seguida o algoritmo percorre a rede de cima para baixo, eliminando os caminhos que são gerados erroneamente pela condição de continuidade. Os segmentos que são eliminados por este processo são artefatos gerados pela condição de continuidade. Em situações extremas, onde duas regiões de altitudes similares estão conectadas por um caminho de um pixel de largura, esta condição produz um canal de drenagem onde não poderia existir topograficamente. O procedimento de eliminação dos “loops” remove também estes canais.

Finalmente, uma série de passos de pós-processamento é feita para excluir da rede de drenagem extraída os “loops” formados por um pixel, mostrados na figura 20. O resultado é a rede de drenagem completa mostrada na figura 21.

De modo a eliminar o fenômeno dos canais de escoamento em áreas de mínimo, os pixels que fazem parte das depressões têm seus valores substituídos por um valor de altitude especial chamado Lake.

Durante o segundo estágio do algoritmo (utilização da condição de conectividade), as depressões preenchidas são processadas por último. Quando as depressões não são preenchidas ocorre a extração de canais de drenagem não existentes. Isto ocorre devido às depressões serem locais de mínimo, e como tais originam pontos finais dos canais. Devido à condição de continuidade os pontos finais são conectados aos canais.

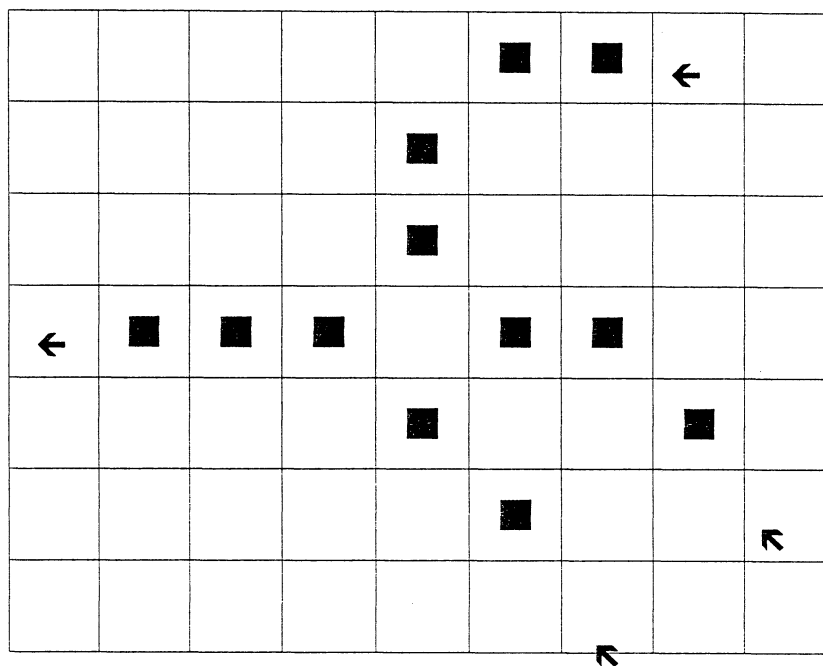
Figura 19 - Resultado final do algoritmo de esqueletização. Os “loops” estão nos retângulos, enquanto os pontos finais artificiais estão circulados



Fonte: MEISELS et al. (1995, p. 191)

Segundo os autores, os problemas que podem surgir em áreas planas não ocorrem neste algoritmo porque a direção do fluxo depende da curvatura das curvas de nível e não da distância entre as mesmas. Além disso, devido à condição de conectividade, não existe a possibilidade da extração resultar segmentada, como no caso de algoritmos baseados na localização topográfica.

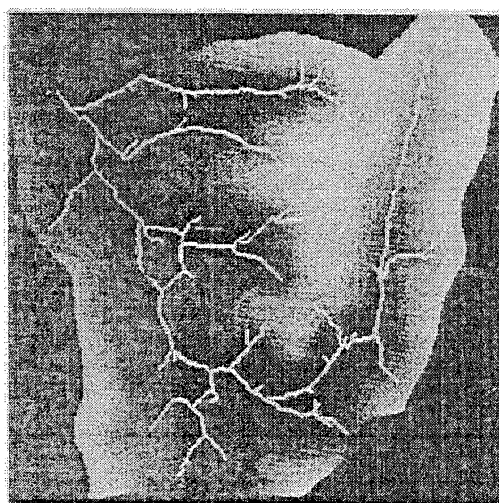
Figura 20 - “Loops” de um pixel, resultantes da natureza discreta do DEM



Fonte: MEISELS et al. (1995, p. 193)

Figura 21 - Rede de drenagem extraída após os procedimentos de enumeração da rede.

Adotou-se o valor de $k_T = 4$



Fonte: MEISELS et al. (1995, p.194)

5 METODOLOGIA

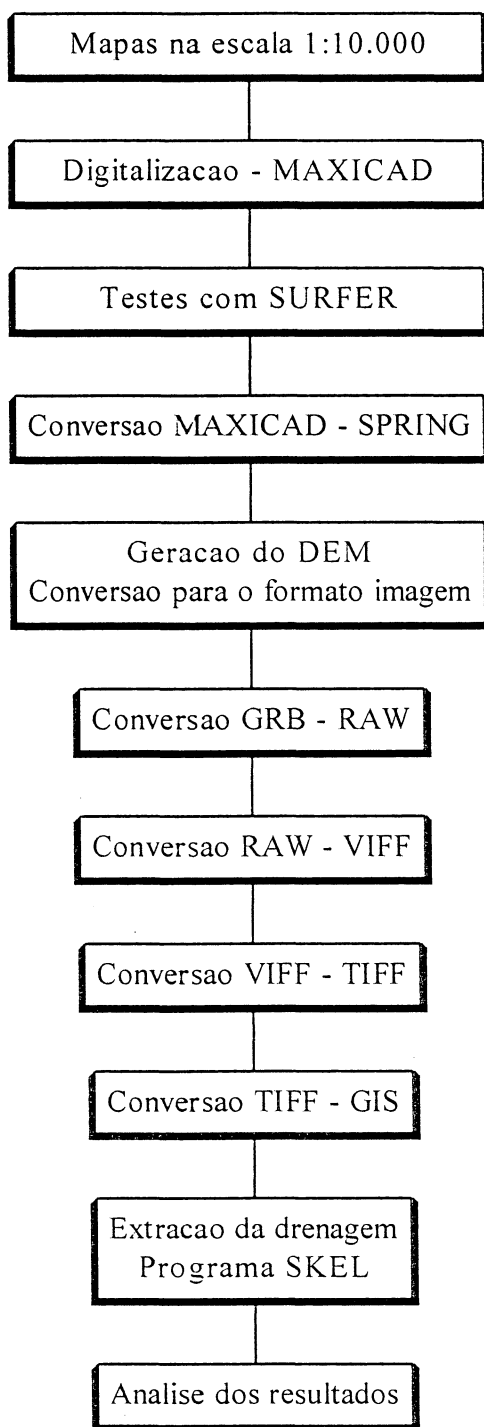
5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo fornece a descrição dos métodos empregados no trabalho para a realização das diversas etapas envolvidas. No fluxograma mostrado na figura 22 estão esquematizadas todas as etapas do trabalho. A primeira etapa refere-se à aquisição dos dados, descrevendo de maneira simplificada o “software” utilizado, bem como a metodologia empregada.

Na etapa de geração do DEM são descritos os conceitos básicos de funcionamento do “software” SPRING e os procedimentos para a obtenção do DEM que servirá como base para a extração da drenagem.

Na fase de extração da rede de drenagem descreve-se a utilização do programa SKEL e são apresentados os resultados obtidos.

Figura 22 - Fluxograma de trabalho



5.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS

A etapa de aquisição dos dados talvez seja a mais importante para a obtenção de um DEM de qualidade. A literatura afirma que a utilização de curvas de nível como fonte de dados para a geração de DEM's possui alguns problemas, como por exemplo a falta de informação entre as curvas.

Apesar destas considerações, neste trabalho adotou-se o método de aquisição de dados a partir da digitalização de curvas de nível, devido aos documentos cartográficos da área em questão estarem disponíveis.

5.2.1 Digitalização das cartas na escala 1:10.000

Com o objetivo de realizar a aquisição dos dados para a geração do DEM foram obtidas junto à COMEC (Coordenadoria da Região Metropolitana de Curitiba) nove cartas planialtimétricas da região do sítio de Tranqueira, cuja articulação está no anexo 1. Esta região possui uma área aproximada de 34,8 km², situada entre as latitudes 25°20'00" S e 25°12'30" S e longitudes 49°22'30" W e 49°11'15" W, abrangendo os municípios de Almirante Tamandaré, Colombo e Rio Branco do Sul, no Estado do Paraná. As cartas de escala 1:10.000, com equidistância entre curvas de nível de 5 metros, possuem como demais parâmetros cartográficos:

- a) Projeção UTM - Universal Transversa de Mercator;
- b) Datum Horizontal: Córrego Alegre - MG;

- c) Datum Vertical: Imbituba - SC;
- d) Meridiano Central: 51° W;
- e) Elipsóide de Referência: Hayford.

O procedimento de coleta dos dados seguiu o método de digitalização manual das curvas de nível. O "software" utilizado para esta tarefa foi o MaxiCAD, um sistema CAD (Computer Aided Design), desenvolvido em plataforma DOS, que roda em ambiente Windows. Este sistema permite a criação e manutenção de bases de dados digitais, sendo um sistema projetado especialmente para mapas, tratando as questões cartográficas como Projeções Cartográficas, datum e coordenadas geográficas de maneira eficiente, além de permitir a preparação dos mapas para o geoprocessamento.

O sistema MaxiCAD permite a entrada de dados por meio de coordenadas planas ou geográficas. As informações são armazenadas em níveis de informação, isto é, conjuntos de entidades com características semelhantes.

Os equipamentos utilizados nesta etapa foram dois computadores, sendo um PC-386 e um PC-486, e duas mesas digitalizadoras, uma Digigraf formato A1 e uma Summagrid IV formato A0.

O primeiro passo para a geração da base digital neste sistema foi a criação de um novo arquivo, onde foram fornecidas as coordenadas geográficas da área e os demais parâmetros cartográficos, como elipsóide, datum, hemisfério e escala.

Em seguida foram inseridos os níveis de informação, que receberam os dados digitalizados. Os níveis criados estão relacionados na tabela 1.

Tabela 1 - Relação de níveis criados para o projeto

NÍVEL	DESCRIÇÃO	COR
0000	Área de desenho	Azul
00001	Curvas mestras	Vermelho
00002	Pontos cotados	Preto
00003	Malha	Preto
00004	Curvas intermediárias	Amarelo
00005	Textos	Preto

Depois da inserção dos os níveis, realizou-se o procedimento chamado orientação da folha, isto é, a carta original foi colocada sobre a mesa digitalizadora e as coordenadas dos cantos da folha foram inseridas através do cursor da mesa. Esta operação faz com que seja feita uma correspondência entre as coordenadas da carta e as coordenadas do arquivo, permitindo a entrada dos dados.

Em seguida pôde-se iniciar a digitalização propriamente dita. O MaxiCAD possui uma função para a digitalização de curvas de nível, chamada "inserção por distância fixa ativada". Esta função permite que a curva de nível seja seguida com o cursor e que, ao ser percorrida uma distância pré-fixada sejam armazenadas as coordenadas do ponto. Neste trabalho adotou-se a distância de 15 metros no terreno, ou 1,5 mm na escala do mapa. Isto significa que a cada 1,5 mm percorridos pelo cursor da mesa sobre a carta um ponto foi armazenado no arquivo.

Após a digitalização das nove cartas, as mesmas foram plotadas para que pudessem ser verificados possíveis erros ou falhas no processo, como por exemplo a falta de algumas curvas de nível.

Corrigidos estes erros, as cartas passaram pelo processo de junção, onde os nove arquivos individuais foram unificados. Isto foi realizado por meio do aplicativo

Utilitários MaxiCAD, no qual existe uma ferramenta chamada *Integração*, que executa a junção dos arquivos. Em seguida foi necessário realizar a junção das curvas de nível de mesmo valor que encontravam-se nas bordas dos arquivos que foram unificados, de modo que formassem uma única entidade.

Para a digitalização das cartas foram gastas 131 horas, o que representa uma média de 15 horas por folha. O tempo de verificação e correção das folhas foi de aproximadamente 12 horas e o trabalho de junção das curvas no arquivo único demandou 10 horas. No total foram gastas 153 horas, o que representa uma média de 17 horas por folha.

No início dos trabalhos verificou-se qual o intervalo entre curvas de nível seria adequado para a geração do DEM. A princípio optou-se por digitalizar apenas as curvas mestras, com equidistância de 50 metros, devido ao relevo da região ser bastante acidentado, o que à primeira vista proporcionaria um bom resultado. Para verificar se este intervalo realmente seria adequado, foram realizadas testes com "software" SURFER, que mostraram que este intervalo não se mostrou eficiente. As áreas que possuíam poucas informações ficaram representadas por platôs, não indicando a realidade da região. O resultado obtido pela interpolação para a folha 398 (folha central) está apresentado na figura 23. O DEM foi gerado utilizando o método de interpolação por redes triangularizadas (TIN). Como modo de avaliar o DEM obtido, foram geradas as curvas de nível a partir do mesmo, mostradas na figura 24. A figura 25 apresenta a digitalização das mesmas curvas de nível realizada com o MaxiCAD.

Comparando as figuras 24 e 25 pode-se perceber que em algumas regiões o relevo foi modificado, devido justamente à falta de informações. Desse modo, passou-se à digitalização das curvas de nível intermediárias, com equidistância de 10 metros. Novamente os dados foram introduzidos no SURFER, proporcionado agora melhores resultados.

Realizando a interpolação para a folha 398 chegou-se ao resultado da figura 26. Foi gerado também o mapa de curvas de nível, mostrado na figura 27, que comparado com os dados digitalizados mostrados no anexo 2 indicam que as duas representações são mais fiéis do que as primeiras.

Figura 23 - Modelo Digital de Altitude gerado com o “software” SURFER a partir das curvas de nível mestras da folha 398 utilizando o método de interpolação por redes triangularizadas

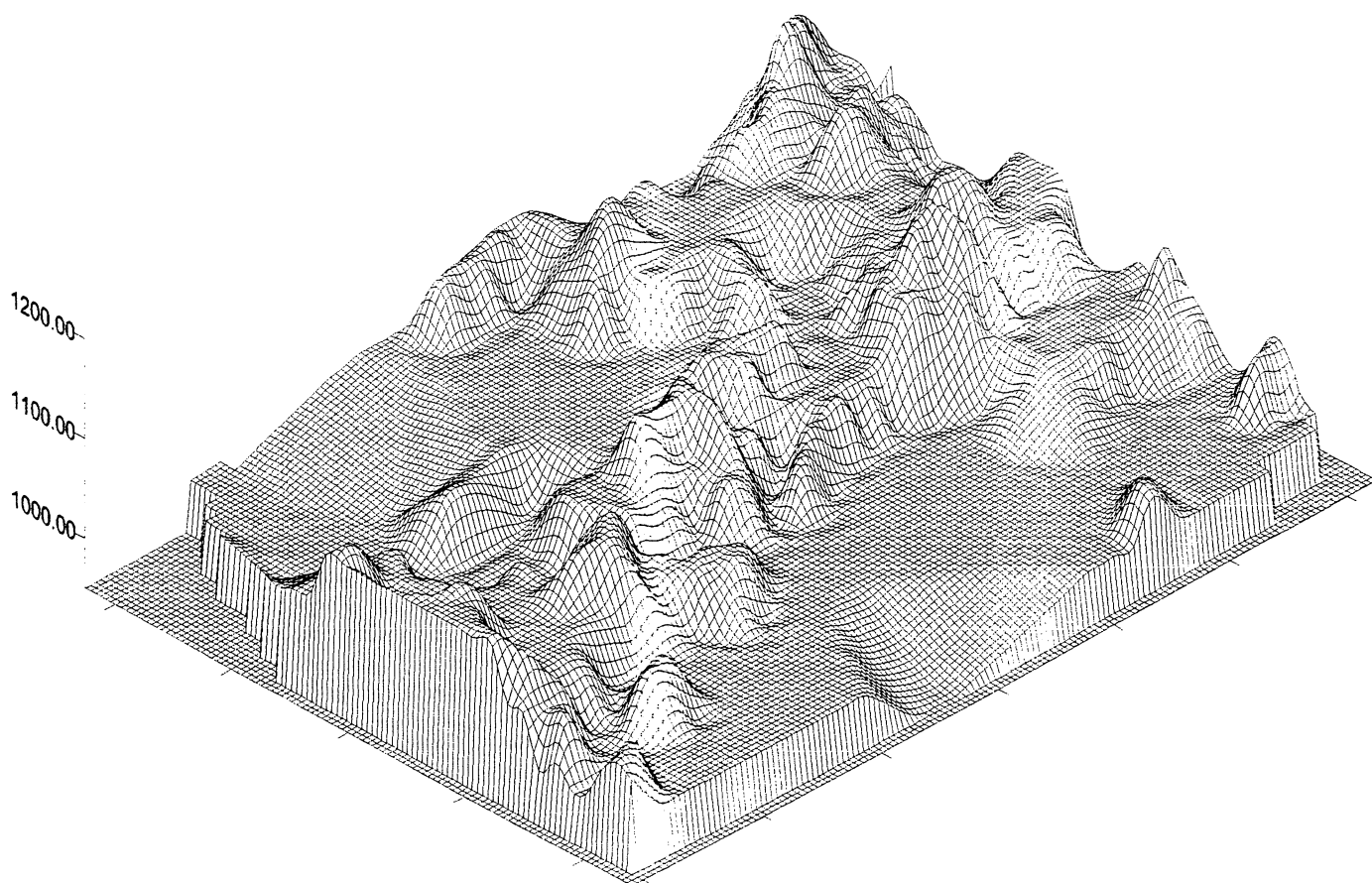


Figura 24 - Mapa da folha 398 gerado com o “software” SURFER a partir do DEM contendo apenas as curvas de nível mestras

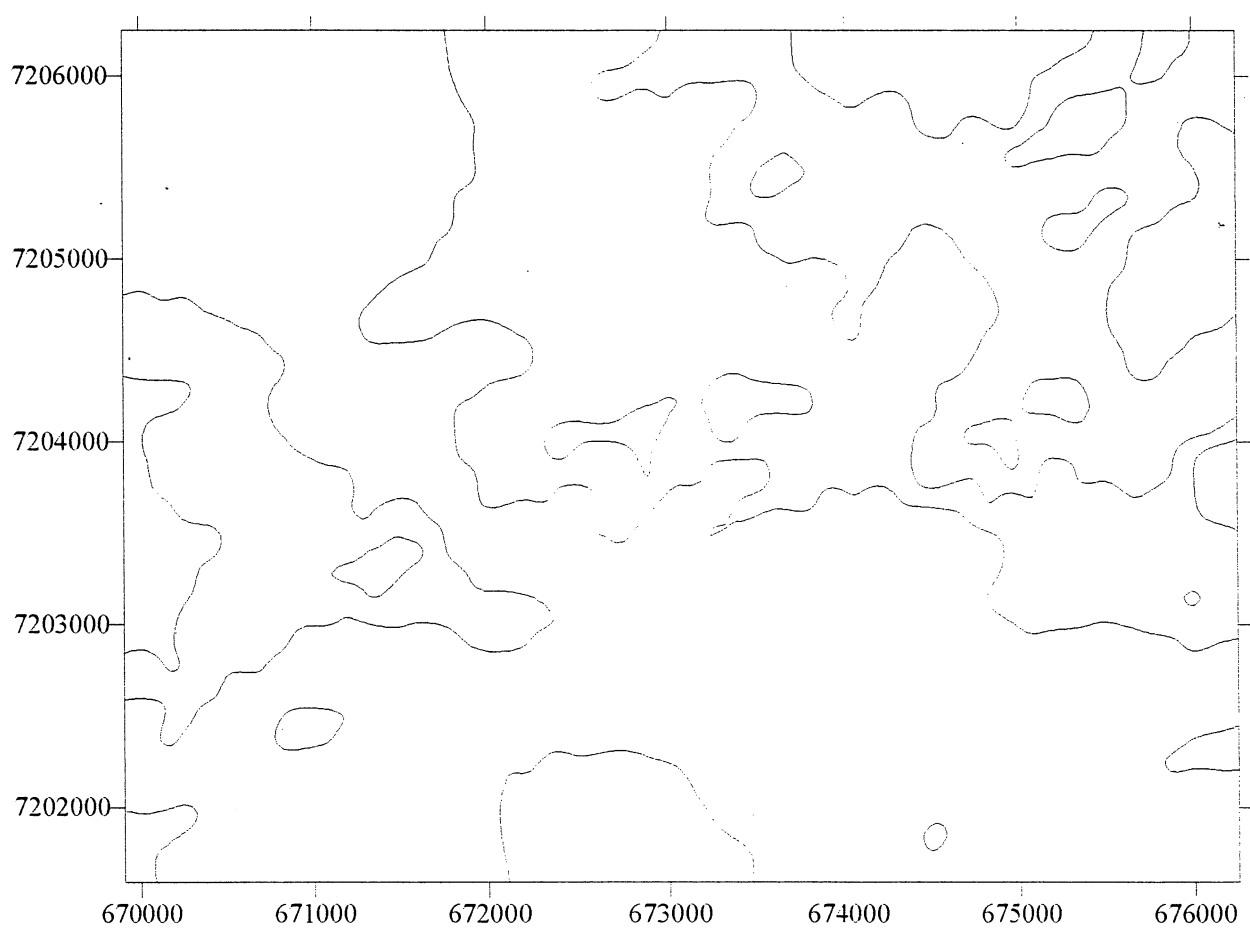


Figura 25 - Curvas de nível mestras da folha 398, digitalizadas com o MAXICAD

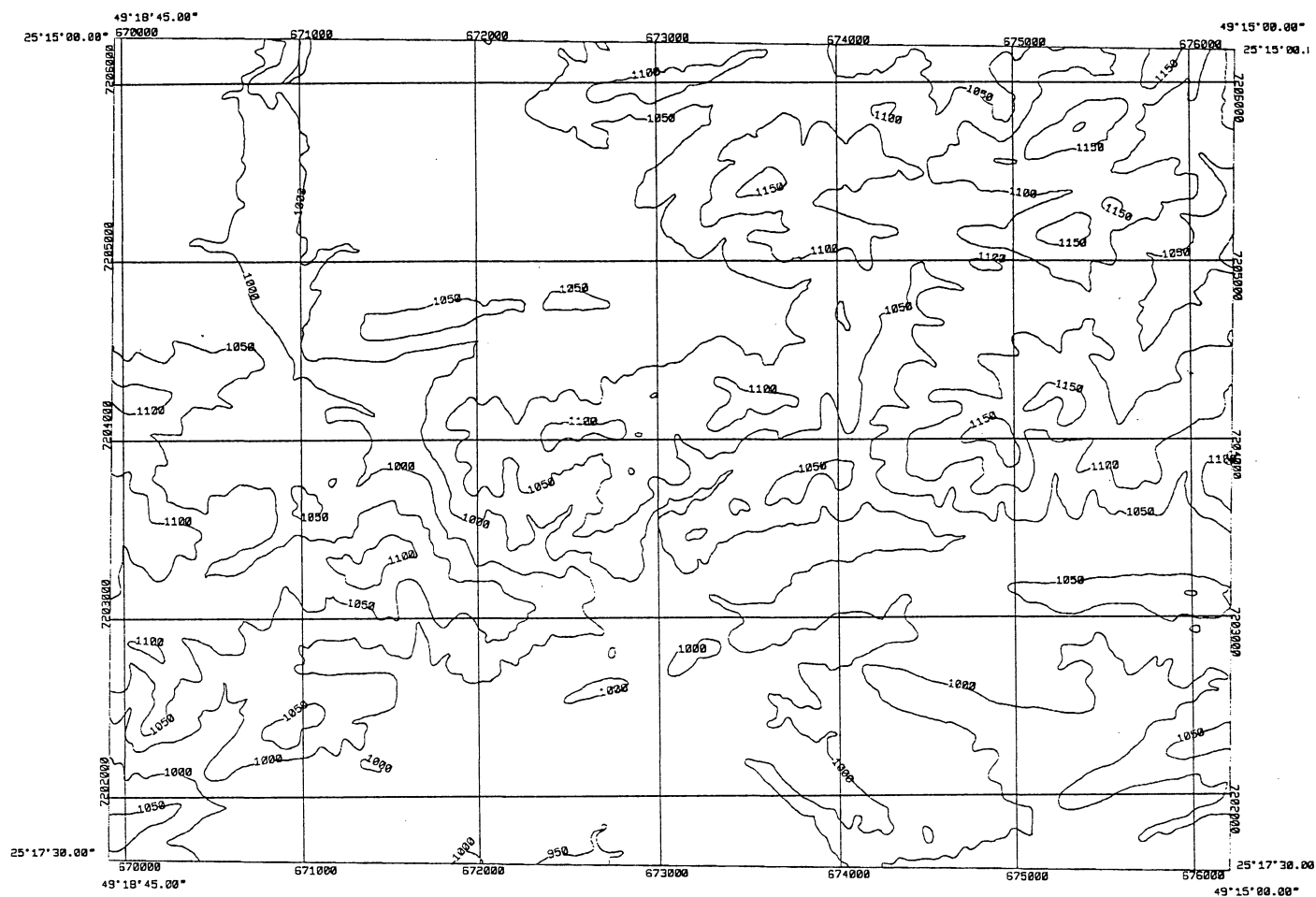


Figura 26 - Modelo Digital de Altitude gerado com o “software” SURFER a partir da folha 398 com curvas de nível eqüidistantes de 10 metros utilizando o método de interpolação por redes triangularizadas

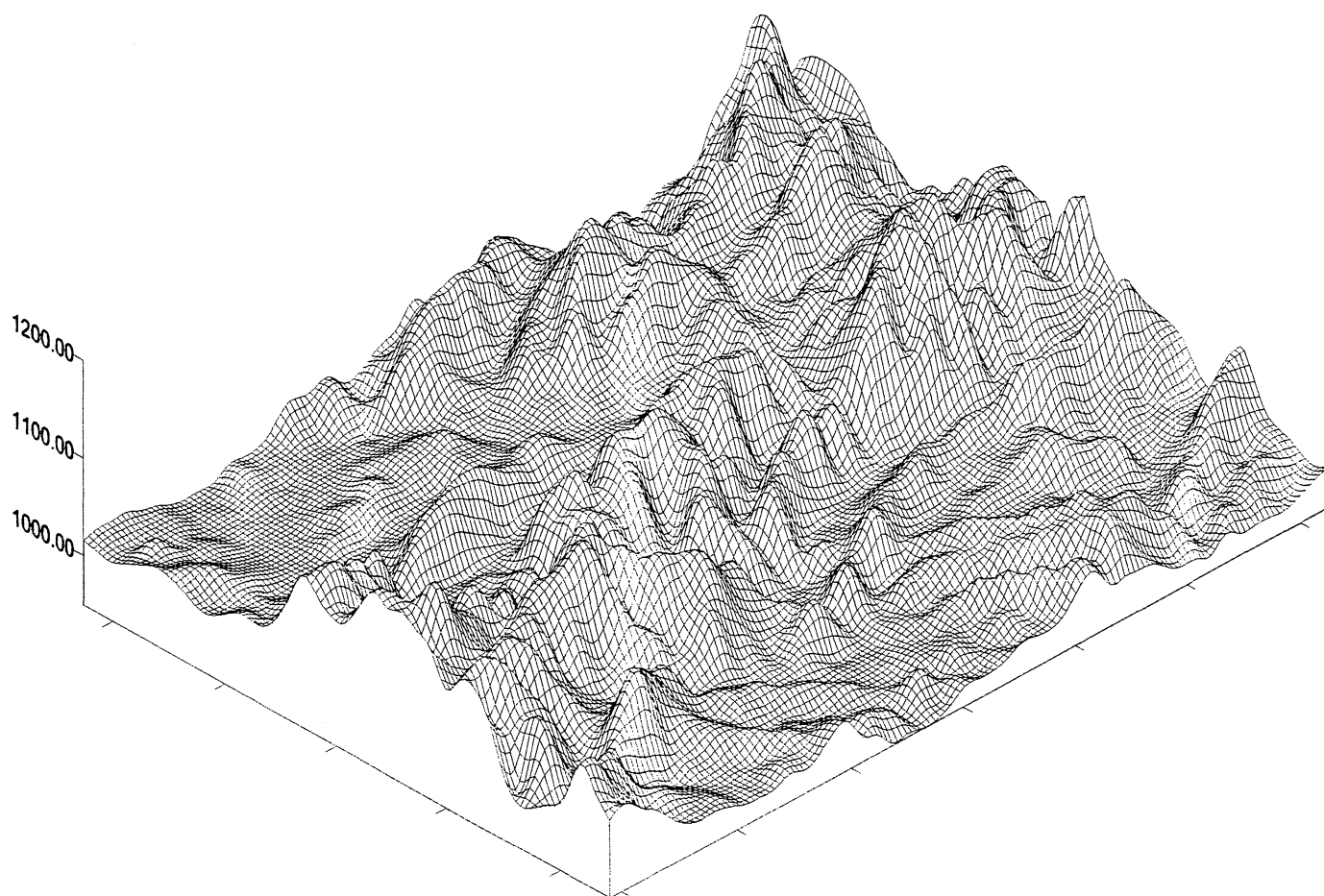
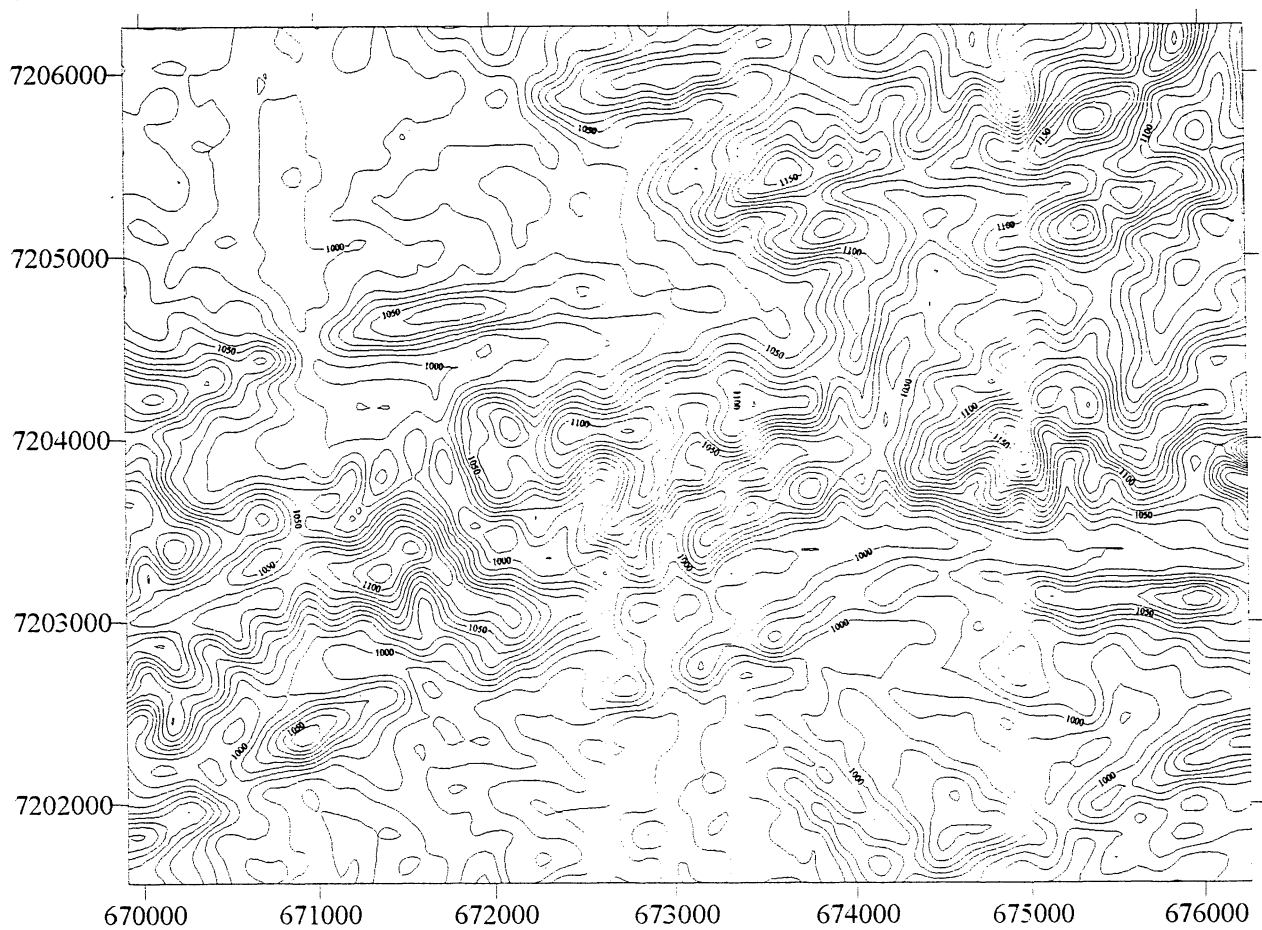


Figura 27 - Mapa da folha 398 gerado com o “software” SURFER a partir do DEM contendo
as curvas de nível eqüidistantes de 10 metros



5.3 GERAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ALTITUDE

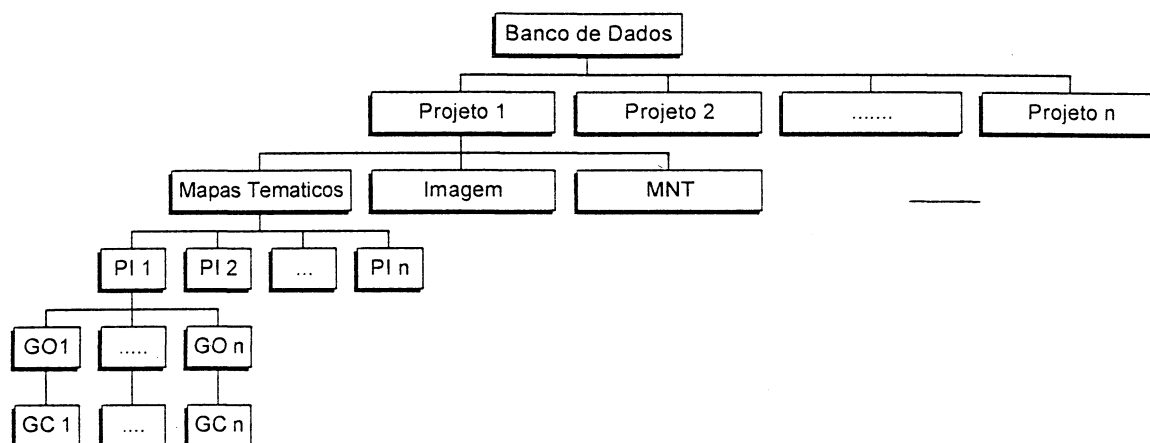
Para a geração do DEM foi utilizado um Sistema de Informações Geográficas (GIS). Segundo Burrough (1986) “um GIS é um conjunto de ferramentas para coleta, armazenamento, recuperação, transformação e visualização de dados espaciais a partir do mundo real para um conjunto particular de propósitos” (BURROUGH, 1986, p. 6).

O sistema adotado neste trabalho foi o SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas - desenvolvido pelo INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais). Este sistema é utilizado em estações de trabalho UNIX, utilizando um banco de dados geográficos. O SPRING permite adquirir, armazenar, combinar, analisar e recuperar informações codificadas espacial e não-espacialmente. É um sistema que combina funções de processamento de imagens, análise espacial e modelagem numérica de terreno, em um único ambiente interativo.

5.3.1 Estrutura conceitual do SPRING

O SPRING possui um modelo conceitual que fornece a estrutura para um único ambiente que integra diferentes formatos e tipos de dados geográficos. Os conceitos básicos relacionados a este modelo conceitual são apresentados no esquema 1.

Esquema 1 - Esquema conceitual do SPRING



Na estrutura acima, um banco de dados geográfico é a estrutura que armazena os dados de um GIS e permite recuperá-los em suas diferentes formas (imagens, vetores, grades). Além disso, armazena as informações descritivas (atributos não-espaciais).

O Sistema de Gerenciamento do Banco de Dados (DBMS - Data Base Management System) atualmente substitui os arquivos internos que anteriormente armazenavam os dados geográficos e seus atributos. O banco de dados do SPRING pode ser gerenciado por dois sistemas: INGRES, um banco de dados comercial e SPRINGDBMS, um emulador do banco de dados desenvolvido especificamente para o SPRING.

Observa-se que um banco de dados pode armazenar vários projetos. Cada projeto corresponde a um conjunto de dados de interesse em uma área geográfica e projeção cartográfica específicas.

Os projetos armazenam os planos de informação (PI), que são conjuntos de geo-objetos (GO) que possuem características básicas em comum. Por sua vez, os geo-objetos são as entidades gráficas que podem ser manipuladas pelo SPRING. Cada geo-objeto

corresponde a um elemento geográfico distinto e é armazenado e recuperado individualmente pelo SPRING.

Além disso, cada PI está associado a uma categoria e refere-se a um único modelo de dados. Uma categoria distingue os diversos tipos de dados geográficos agrupando grandezas geográficas semelhantes. O SPRING possui três categorias: mapas temáticos, Modelo Numérico de Terreno (MNT) e imagens.

Associado ao conceito de geo-objeto está a geoclasse (GC), que controla a visualização dos mesmos, armazenando os atributos de apresentação, como cor ou preenchimento, que são comuns a geo-objetos de uma mesma categoria.

5.3.2 Utilização do SPRING

Os equipamentos utilizados nesta etapa do trabalho foram duas “workstations”, sendo uma HP, pertencente ao Departamento de Geociências, e uma IBM, do Departamento de Geologia. A “workstation” HP, possui a versão 1.0 do SPRING, que não permite que sejam desenvolvidas algumas tarefas, como por exemplo, entrada de dados ASCII. Desta maneira, o Departamento de Geologia permitiu a utilização da “workstation” IBM, com a versão 1.1 do SPRING, para o desenvolvimento do trabalho. Entretanto, este equipamento possui pouco espaço de armazenamento, sendo que alguns testes realizados com a área total do projeto mostraram a inviabilidade do processamento dos dados. Por isso, optou-se por realizar a geração do DEM apenas para a folha 398 (folha central).

Os arquivos .CAD gerados no MaxiCAD foram transformados para o formato seqüencial .SEQ, que é um formato ASCII passível de exportação para outros “softwares” além de permitir que o arquivo tenha seu “lay-out” alterado.

Para a entrada no SPRING este arquivo seqüencial contendo as curvas de nível precisou ser convertido para o formato .ASC, com a seguinte estrutura:

#Linha	Nlin	Nptos	Cota
	X_1		Y_1
	X_2		Y_2

	X_N		Y_N

onde Nlin é o número da linha (1,2,3,.....n), Nptos é o número de pontos que compõem a linha, e Cota o valor da altitude da linha.

Para realizar a conversão entre os formatos foram desenvolvidos dois programas, ambos na linguagem C, que encontram-se nos anexos 3 e 4. O programa Convarq1 tem como entrada o arquivo .SEQ e armazena apenas o número de pontos e a cota de cada linha em um arquivo auxiliar .AUX. O programa Convarq2 tem como entrada os arquivos .SEQ e .AUX e gera o arquivo de saída .ASC. Uma parte do arquivo ASC gerado para este trabalho encontra-se no anexo 5.

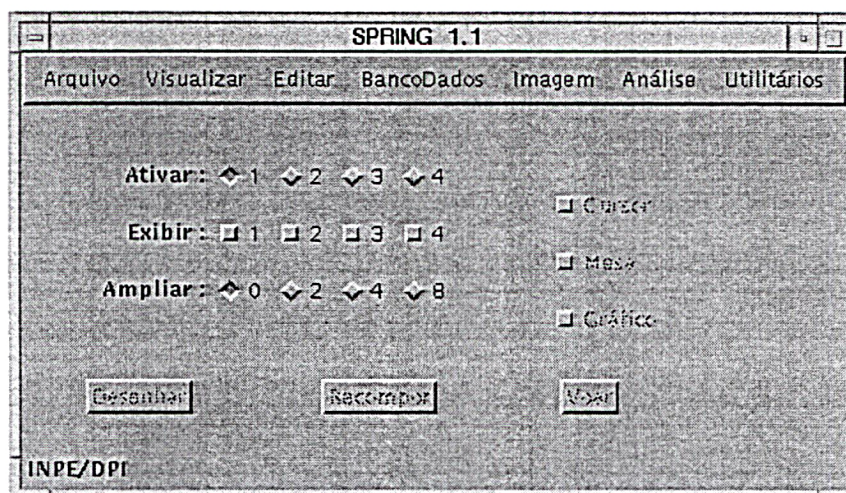
5.3.2.1 Criação do banco de dados

Antes de iniciar uma sessão de trabalho com o SPRING foi necessário criar um banco de dados. Para isto executou-se o programa *createspdb*, criando-se o banco de dados *Projetodem*. A seguir foi necessário definir a variável SPRINGDB, que ativa o banco de dados criado ou qualquer outro banco de dados existente, por meio do comando: `setenv SPRINGDB Projetodem`.

Pôde-se então digitar SPRING para executar o programa, aparecendo a janela da figura 28. O próximo passo foi a definição das propriedades do banco de dados, por meio do menu *Banco de Dados* opção *Propriedades*, que apresenta a janela mostrada na figura 29. Neste ponto foram inseridas duas categorias. A primeira foi a categoria *Altimetria*, pertencente ao modelo Numérico, onde as geoclasses foram definidas como sendo os intervalos entre as curvas de nível, variando de 50 em 50 metros.

A outra categoria criada foi chamada de *Imagem*, recebendo apenas uma geoclasse, como o nome de *Imagemmnt*, para armazenar o DEM no formato imagem.

Figura 28 - Janela principal do SPRING



5.3.2.2 CRIAÇÃO DO PROJETO

Esta operação pode ser realizada antes ou depois da criação das categorias e geoclasses. Para isto foi selecionado o menu *Arquivo* e a opção *Criar Projeto*, aparecendo a janela mostrada na figura 30. Foram inseridos os dados cartográficos relativos à área do trabalho, que são:

Nome do projeto: aquífero

Projeção: UTM - Córrego Alegre

Elipsóide: Hayford

Longitude de origem (MC): 51°

Coordenadas do retângulo envolvente: 49°18'45" W e 49°15'00" W

25°17'30" S e 25°15'00" S

Figura 29 - Janela do SPRING para entrada das propriedades do Banco de dados

The image shows a software window titled "SPRING 1.1 : Propriedades". It is divided into two main sections: "Categorias" and "Geoclasses".

Categorias: A list box contains "altimetria" (selected) and "Imagem". Below it, a text field "Nome:" contains "altimetria". A dropdown menu "Modelo:" is set to "Numérico". There are three buttons: "Criar", "Suprimir", and "Atributos...".

Geoclasses: A list box contains three entries: "1. 700-750", "2. 750-800", and "3. 800-850". Below it, a text field "Nome:" is empty. There are three buttons: "Criar", "Suprimir", and "Características...".

At the bottom center of the window is a button labeled "Executar".

Figura 30 - Janela do SPRING para inserção de dados de um projeto

Em seguida selecionou-se *Executar*, ficando criado o projeto. Caso o projeto já estivesse criado, deveria ser selecionada a opção *Carregar Projeto* no menu *Arquivo*, para disponibilizar os dados do banco de dados corrente.

Após a criação do projeto passou-se à criação dos planos de informação (PI's). Isso foi realizado no menu *Editar* opção *Projeto*, mostrado na figura 31, onde foram criados

os seguintes PI's: para a categoria *Altimetria* foi criado o PI *relevo*, com escala 1:10.000 e resolução de 20 metros. O valor adotado para esta resolução justifica-se pela falta de material de referência (o manual do SPRING não aborda este item), devido ao problema de espaço de armazenamento, visto que quanto menor a resolução, maior seria o espaço necessário para o armazenamento, e em virtude das perdas ocorridas durante o processo de digitalização e importação dos dados. Para a categoria *Imagem* foram criados os PI's *imagemmedpon* (gerado pela interpolação a partir da média ponderada) e *imagemtin* (gerado a partir do interpolador TIN).

Foi então realizada a importação dos arquivos ASCII, por meio do menu *Arquivo* opção *Importar ASCII, DXF, ARC/INFO*, aparecendo a janela mostrada na figura 32. Foi informado o nome do arquivo a ser importado e o PI no qual ficaria armazenado. Este procedimento encerra a etapa de criação e edição do projeto, sendo que os dados necessários para a geração do DEM já foram importados.

A tabela 2 mostra a estrutura de dados do projeto criado.

Tabela 2 - Estrutura de dados do projeto aquífero

Categoria	Geoclasse	Cor	Plano de Informação	Geo-objetos
Altimetria	700-750	verde-claro	Relevo	
	750-800	amarelo		
	800-850	laranja-amarelado		
	850-900	laranja		
	900-950	laranja-vermelho		
	950-1000	magenta		média
	1000-1050	púrpura-azulado		ponderada/quadrante
	1050-1100	rosa-claro		TIN
	1100-1150	azul-claro		
	1150-1200	azul-céu		
	1200-1250	azul		
Imagem	Imagemmnt	-	imagemmedpon	média ponderada
			imagemtín	TIN

Figura 31 - Janela do SPRING para edição do projeto

SPRING 1.1 : Edição

Categorias

altimetria
imagem

Planos de Informação

relevo

Título : relevo

Retângulo Envolvente

X1: 669903.6 X2: 676257.9
Y1: 7201567.5 Y2: 7206263.0

Escala: 1/ 10000 Resolução X (m) : 20.0
Resolução Y (m) : 20.0

Data/Hora... 11/Jul/96-09:29:18

Criar Plano de Informação

Suprimir Plano de Informação

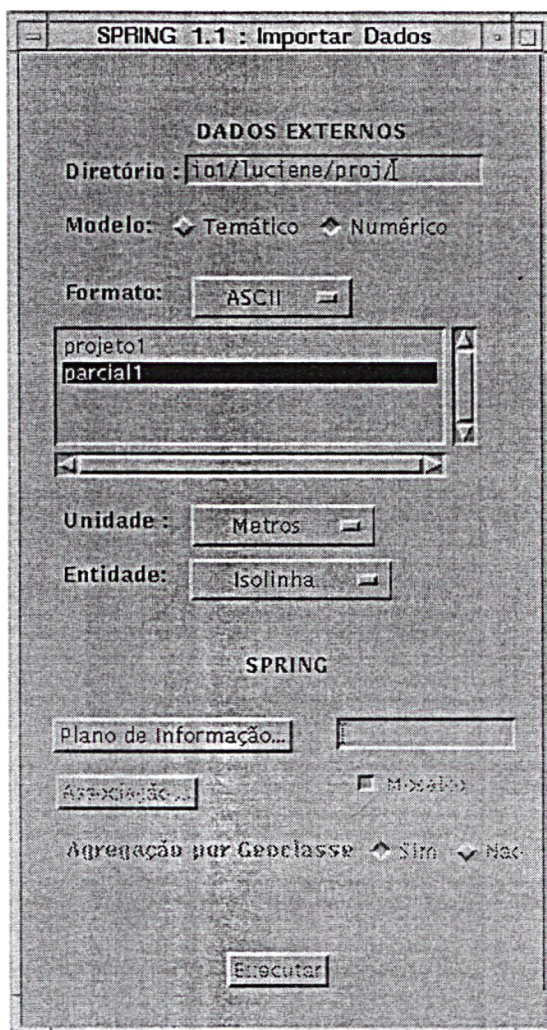
Importar Dados... Editar Geo-objetos...

Editar Dados... Verificar...

Interpolador

Gerar Grade Média Pond/Cota/Quad

Figura 32 - Importação dos dados no SPRING



5.3.2.3 Geração do Modelo Digital de Altitude

No SPRING um DEM é chamado de Modelo Numérico de Terreno (MNT), podendo ser representado por uma grade regular ou triangular. Após os dados terem sido importados, passou-se à geração da grade, que permite manipular os dados. Isto foi feito no

menu *Editar* opção *Projeto*. Primeiro foi escolhida a resolução para a grade, adotando-se 20 metros tanto para x quanto para y.

Em seguida foi escolhido o interpolador. Primeiro a grade foi gerada com o interpolador de Média Ponderada por Quadrante. Este interpolador realiza uma média ponderada das cotas dos oito vizinhos mais próximos de cada ponto. A função de interpolação utilizada é a de ponderação pelo inverso da distância, já abordada no capítulo 2. O resultado da interpolação gerou o DEM mostrado na figura 33. O segundo tipo de interpolador utilizado foi o de grade triangular, sendo que o DEM gerado está mostrado na figura 34. Após os DEM's terem sido gerados, foram incorporados à base de dados como geo-objetos.

A grade gerada necessitou ser transformada para o formato imagem, para que pudesse ser utilizada pelo programa SKEL e para que pudesse ser visualizada em 3D. Isto foi feito por meio do menu *Imagem* opção *Geração de Imagem MNT*, conforme mostrado na figura 35. Esta opção refina uma grade gerando como resultado uma imagem. O refinamento consiste na interpolação dos dados da grade, densificando-a por meio do interpolador bilinear.

O resultado do refinamento do DEM gerado pelo interpolador de média ponderada encontra-se na figura 36 e na figura 37 está o refinamento do DEM gerado por grade triangular.

Figura 33 - DEM gerado pelo interpolador de ponderação pelo inverso da distância

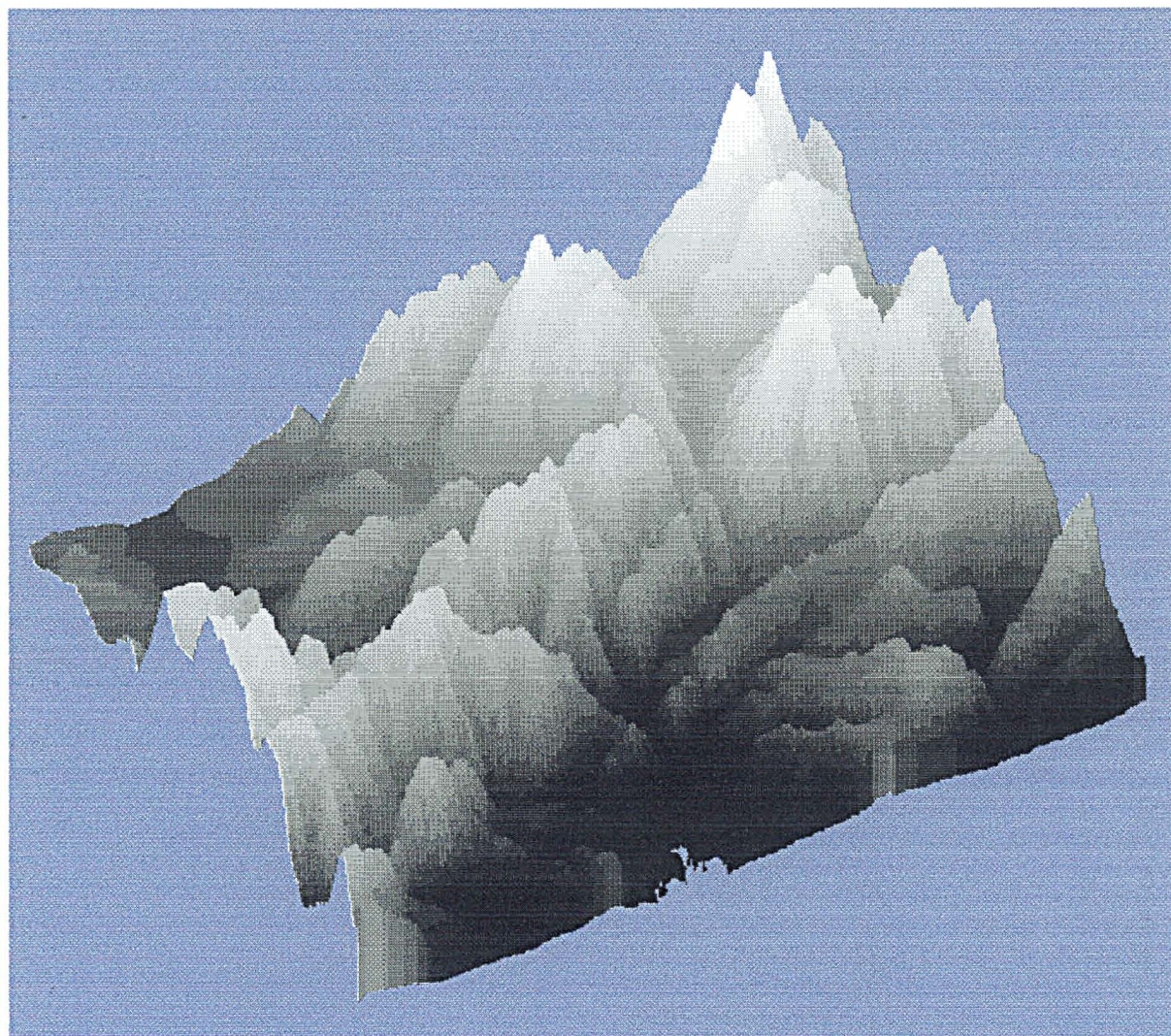


Figura 34 - DEM gerado pelo interpolador TIN

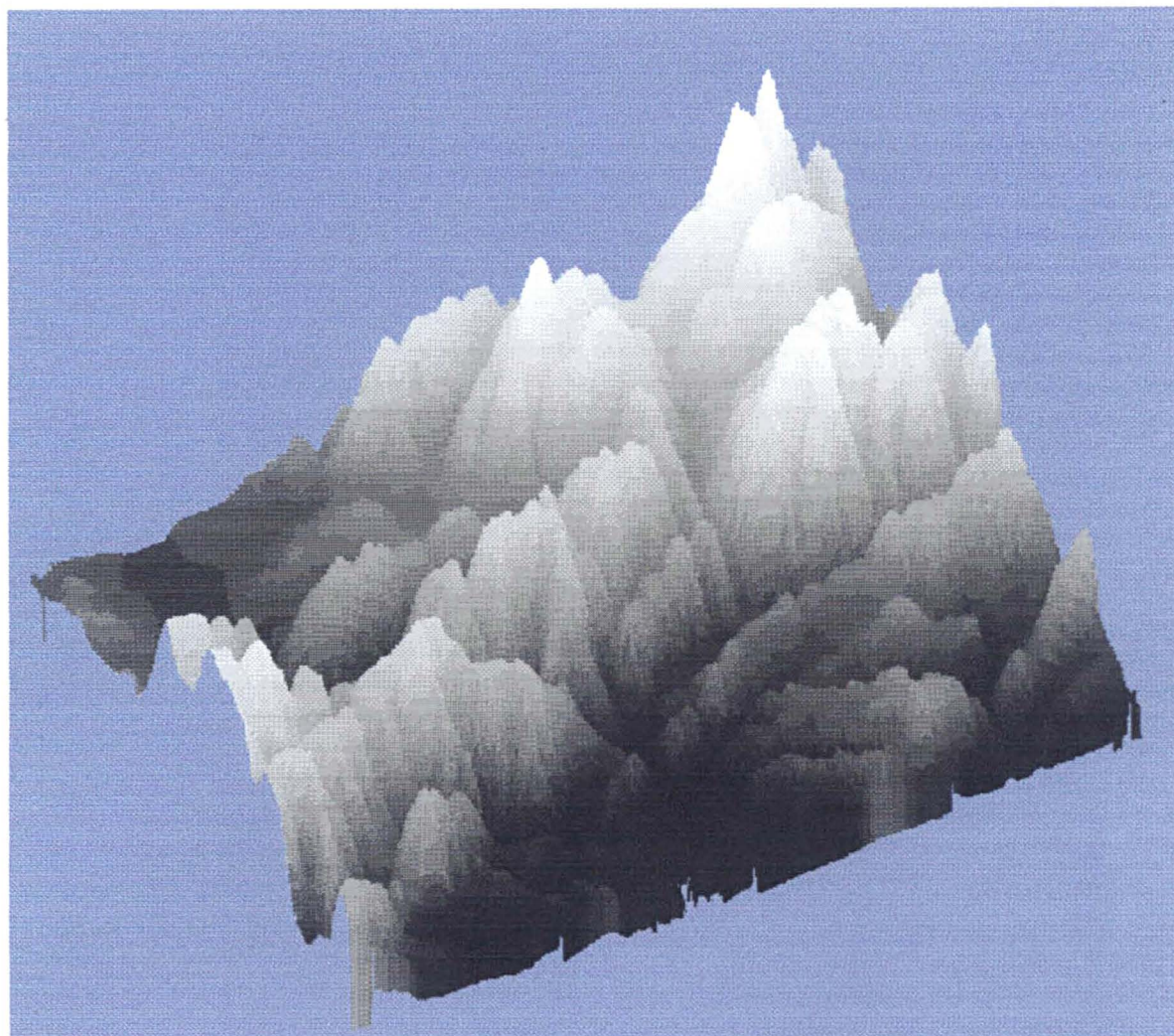


Figura 35 - Refinamento do DEM para geração da imagem

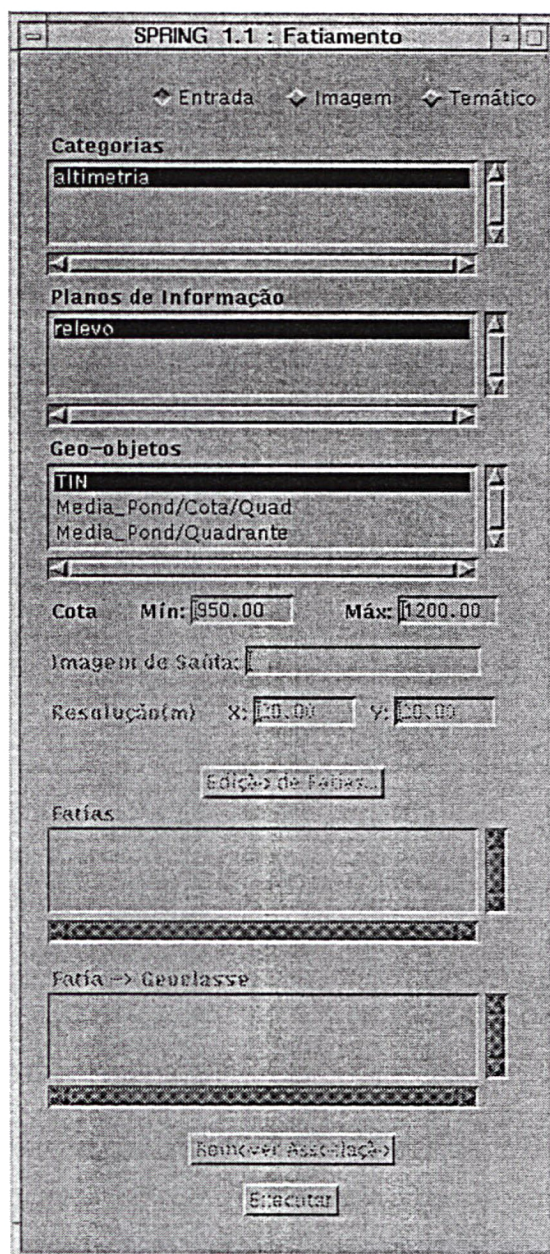


Figura 36 - Imagem refinada a partir do DEM gerado pelo interpolador de ponderação pelo inverso da distância



Figura 37 - Imagem refinada a partir do DEM gerado pelo interpolador TIN



5.4 EXTRAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM

Para a extração da rede de drenagem foi utilizado o programa SKEL desenvolvido na Universidade de Israel, por MEISELS et al. (1995), que pode ser obtido pela Internet, no seguinte endereço: karnieli@bguvms.bgu.ac.il. Este programa é composto de 10 arquivos, sendo:

- a) skel.exe: programa executável no DOS;
- b) skel.c: a parte principal do programa escrita em linguagem C;

- b) skel.c: a parte principal do programa escrita em linguagem C;
- c) func.c: funções auxiliares de entrada e saída, utilizadas pelo programa skel.c;
- d) grlib.c: interface gráfica para DOS;
- e) xgrlib.c: emulação da grlib.c para UNIX, permitindo salvar as imagens no formato ppm;
- f) def.h: arquivo que contém todos os “defines” do programa;
- g) incl.h: arquivo que contém todos os “includes” do programa;
- h) mxlib.c: rotinas X11 que pode ser usada para apresentar as imagens na tela, mesmo se forem salvas;
- i) mxlib.h: arquivo “header” para mxlib.c;
- j) std.pal: palletes usadas em UNIX para salvar as imagens.

O programa aceita como imagens de entrada os seguintes formatos: LAN e CLB, no DOS, e GIS e GRD no UNIX. Como saída o programa gera três imagens no formato PPM: a primeira como uma cópia do DEM original, a segunda com a rede extraída e a terceira com a junção das duas primeiras.

Desta forma, o primeiro passo para esta etapa foi converter o arquivo imagem gerado pelo SPRING, no formato GRB para o formato GIS, permitindo a entrada no programa SKEL. Como não existe uma rotina para converter diretamente os formados, foi necessário realizar uma série de conversões.

Primeiro a imagem foi convertida do formato GRB para o formato RAW, por meio de um programa desenvolvido pelo INPE (grb2raw). Em seguida, no ambiente KHOROS, esta imagem RAW foi transformada em VIFF, e em seguida em TIFF. Finalmente, com o programa ERDAS, foi possível converter a imagem TIFF em GIS.

Após a etapa de conversão das imagens, as mesmas foram processadas pelo programa SKEL, com os parâmetros de k_T variando de 4 a 6. Para o valor de $k_T = 3$ descartou-se a solução, pois as redes extraídas continham muitos detalhes, dificultando as análises.

Os resultados da extração encontram-se a seguir. Na figura 38 está o DEM TIN original reproduzido pelo programa SKEL. Nas figuras 39 e 40 encontram-se respectivamente os resultados para este DEM com k_T igual a 4 e a sobreposição das figuras 38 e 39. Nas figuras 41 e 42 estão os resultados da extração para o valor de k_T igual a 5 e a sobreposição das figuras 38 e 41. Finalmente, nas figuras 43 e 44 estão os resultados da extração para k_T igual a 6 e a sobreposição das figuras 38 e 43.

Na figura 45 está o DEM inverso da distância original reproduzido pelo programa SKEL. Nas figuras 46 e 47 encontram-se respectivamente os resultados para este DEM com k_T igual a 4 e a sobreposição das figuras 45 e 46. Nas figuras 48 e 49 estão os resultados da extração para k_T igual a 5 e a sobreposição das figuras 45 e 48. Nas figuras 50 e 51 estão os resultados da extração para k_T igual a 6 e a sobreposição das figuras 45 e 50.

Figura 38 - Reprodução do DEM TIN feita pelo programa SKEL

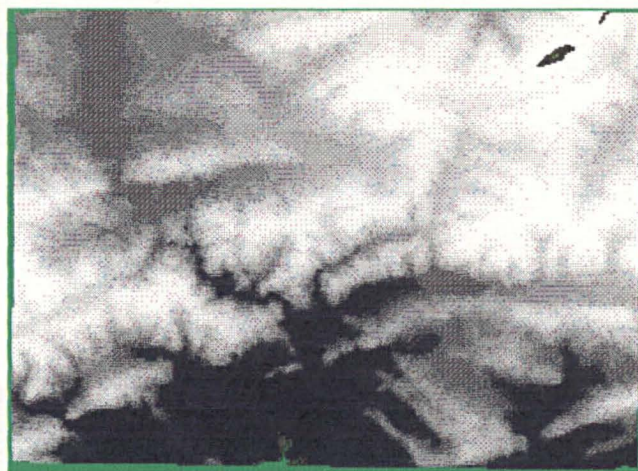


Figura 39 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 4$

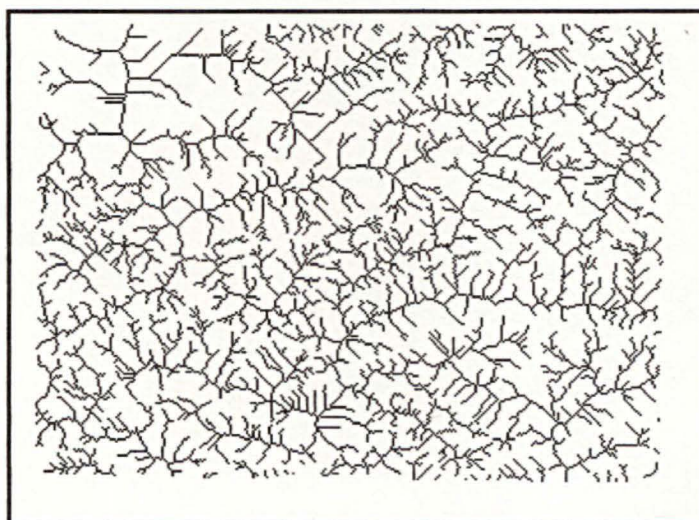


Figura 40 - Sobreposição das figura 38 e 39

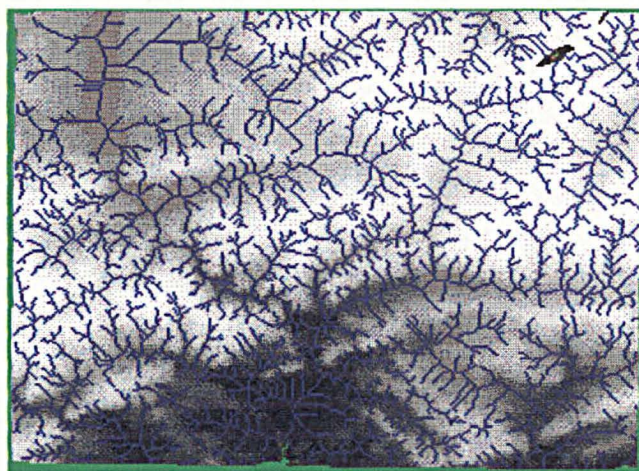


Figura 41 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 5$

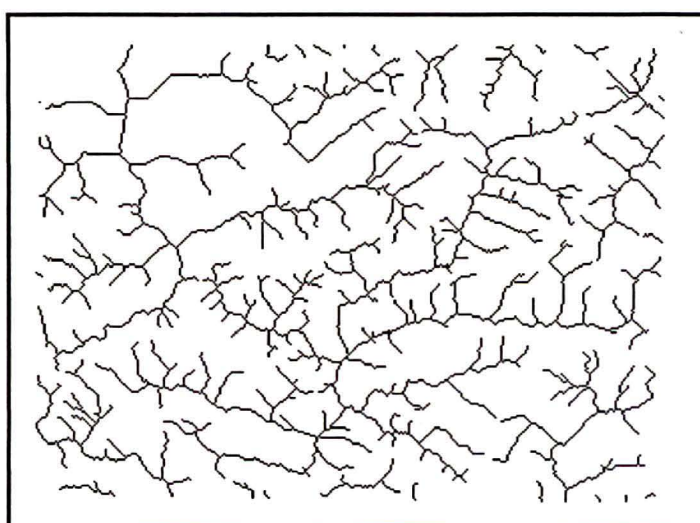


Figura 42 - Sobreposição das figura 38 e 41

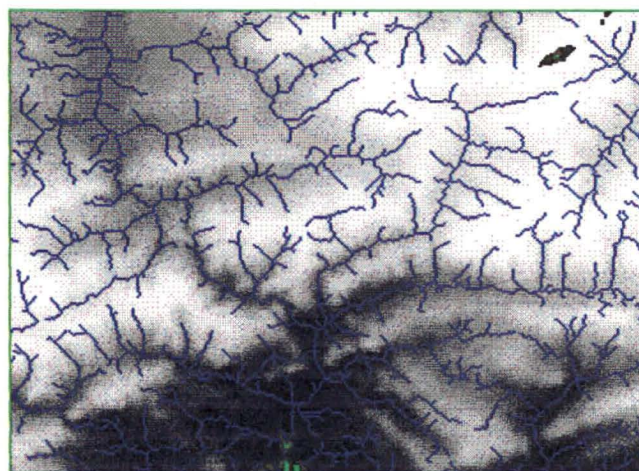


Figura 43 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 6$

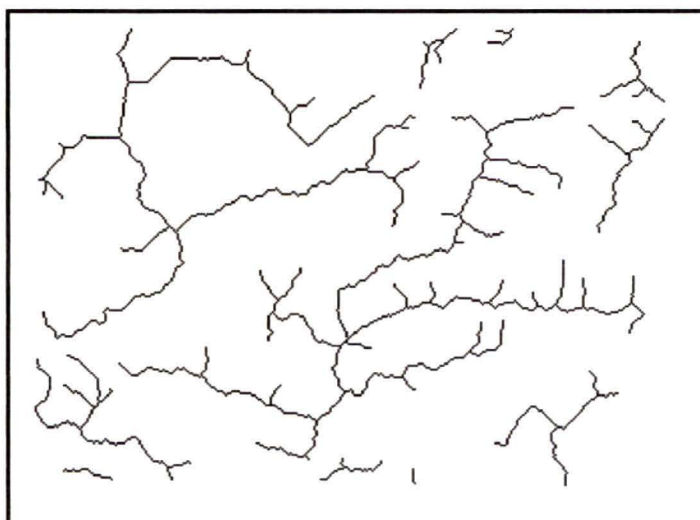


Figura 44 - Sobreposição das figuras 38 e 43

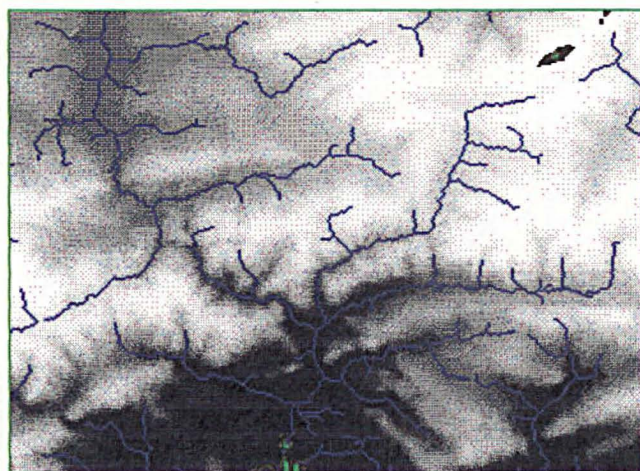


Figura 45 - Reprodução do DEM inverso da distância feita pelo programa SKEL

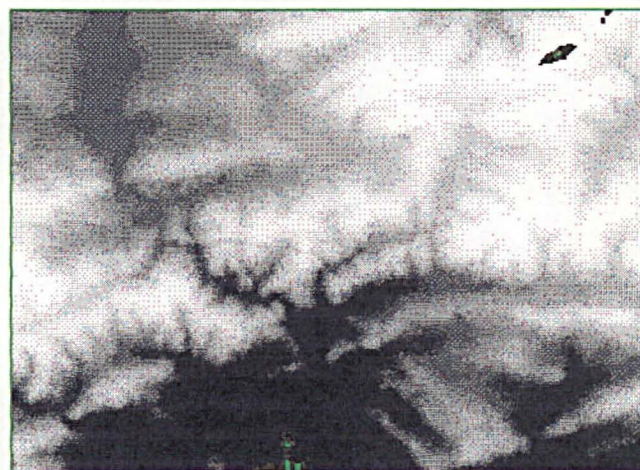


Figura 46 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 4$

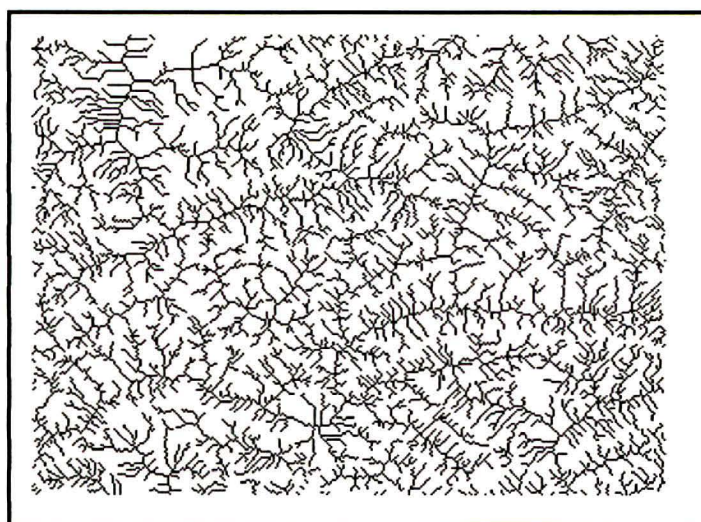


Figura 47 - Sobreposição das figura 43 e 44

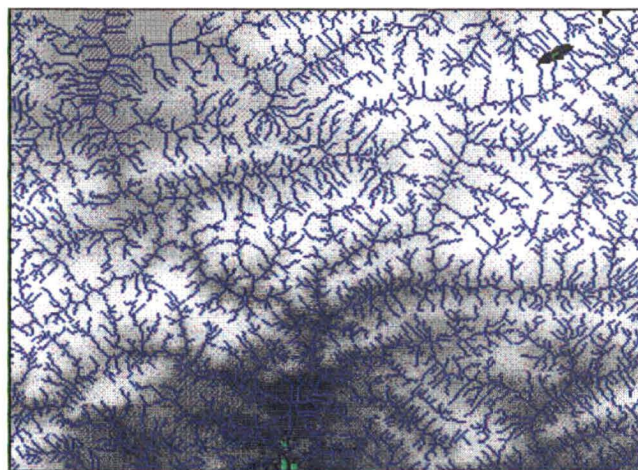


Figura 48 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 5$

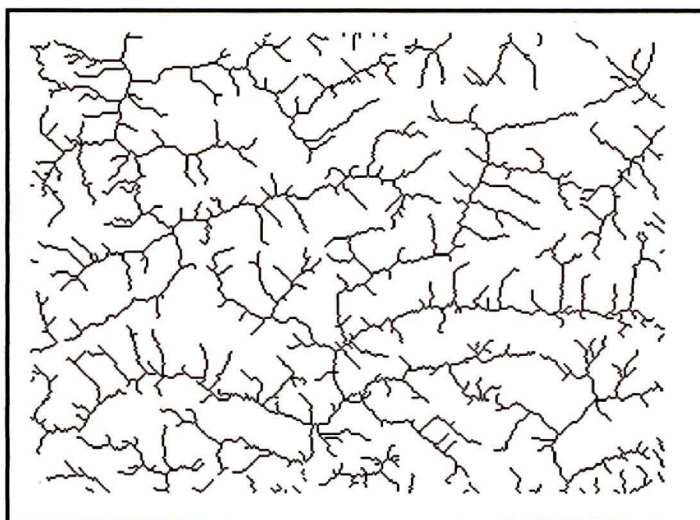


Figura 49 - Sobreposição das figuras 45 e 48

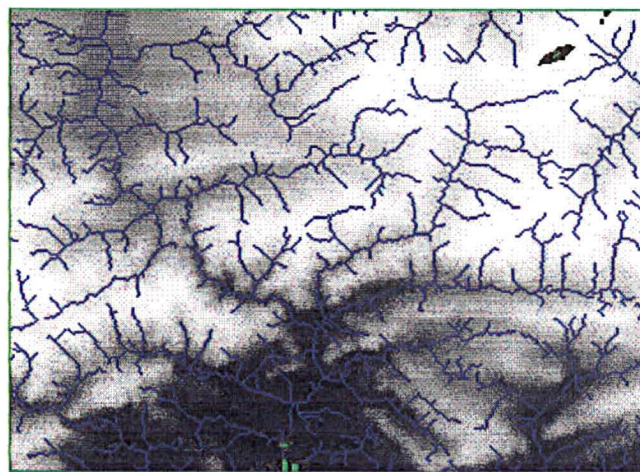


Figura 50 - Rede de drenagem extraída para valor de $k_T = 6$

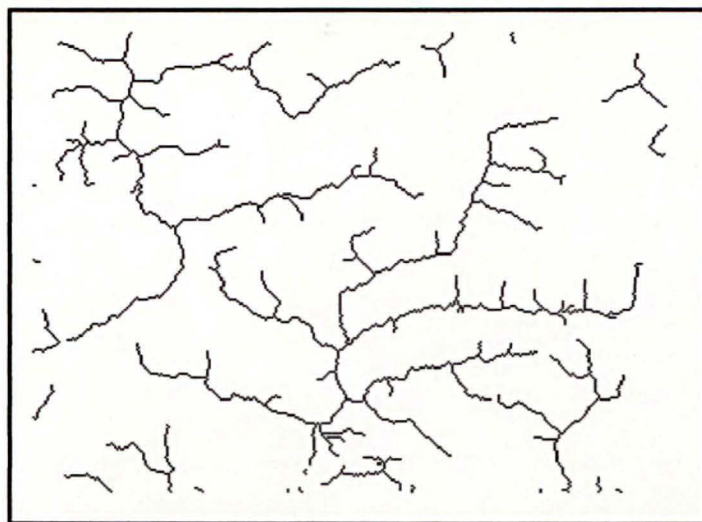
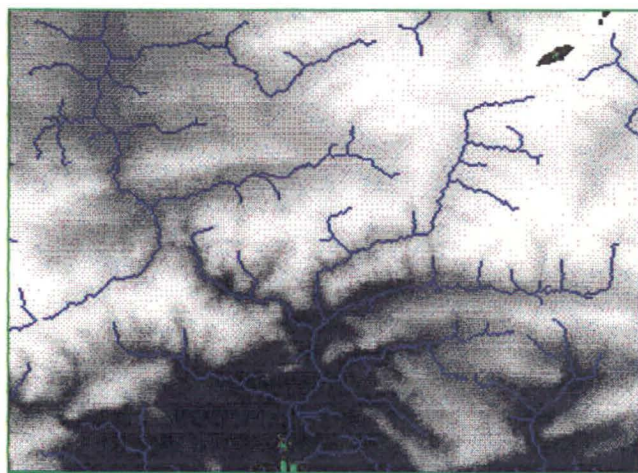


Figura 51 - Sobreposição das figuras 45 e 50



6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para poder realizar a análise dos resultados obtidos, fez-se a sobreposição da rede de drenagem extraída pelo programa SKEL com a rede digitalizada (cedida pela SANEPAR - anexo 6). Isto foi feito com o auxílio do MaxiCAD, que permite a importação de arquivos imagem no formato bmp.

Devido à dificuldade de registrar a imagem, por falta de pontos de controle e mesmo coordenadas, a rede de drenagem extraída pode encontrar-se, em algumas situações, um pouco deslocada da rede original. Entretanto deve-se ressaltar que a comparação estará limitada à posição relativa dos canais e sua configuração.

Os resultados serão discutidos em três partes:

- a) verificação da extração para o DEM gerado pelo interpolador TIN, para as redes de diferentes densidades;
- b) verificação da extração para o DEM gerado pelo interpolador inverso da distância, para as redes de diferentes densidades;
- c) comparação entre os dois interpoladores.

Algumas considerações importantes dizem respeito à área escolhida. Tal área não se mostrou adequada por ser geologicamente complexa, ou seja, é formada por quartzitos, filitos entrecruzados por diques de diabásio, além de áreas de calcário. Estas últimas geralmente apresentam redes de drenagem complexas, dificultando as análises da qualidade dos resultados.

Deve-se considerar também que a rede utilizada para comparação está na escala 1:50.000, gerada a partir de cartas já existentes em escala 1:20.000, que por sua vez foram derivadas das mesmas cartas digitalizadas neste trabalho, em escala 1:10.000 (a folha 398 original encontra-se no axeno 7). Assim, os erros existentes nestas últimas mantiveram-se nas escalas derivadas.

6.1 ANÁLISE DA EXTRAÇÃO REALIZADA A PARTIR DO DEM TIN

6.1.1 Parâmetro $k_T = 4$

Analisando a figura 52, onde se utilizou o valor de $k_T = 4$, destacam-se os seguintes aspectos:

- a) o valor do parâmetro k_T utilizado gerou uma densidade de informações que não permite estabelecer uma comparação fiel com a rede original, devido a esta última ter sido digitalizada com menor densidade;
- b) na área circulada em amarelo ocorreu um erro na extração, devido a um ruído introduzido na conversão dos formatos, mostrada na figura 38;
- c) a área circulada em marrom também apresenta problemas. Nesta área foram geradas linhas paralelas, decorrentes da área ser muito plana nesta região, não havendo informações altimétricas adicionais que permitissem que o cálculo das diferenças de altitude entre os pixels no processo de extração ocorresse de maneira correta; além disso, esta área e outras que apresentaram paralelismo entre as linhas de drenagem são áreas de formação calcária;

d) a área em verde possui uma drenagem inexistente na rede original, devido à complexidade da mesma, formada também por calcário.

6.1.1 Parâmetro $k_T = 5$

A sobreposição da rede extraída com o valor de $k_T = 5$ com a rede original encontra-se na figura 53, podendo-se destacar os seguintes aspectos:

- a) o problema do ruído na imagem original manteve-se, gerando problemas na extração da área circulada em amarelo;
- b) os canais principais e secundários foram extraídos em suas posições corretas. Existem algumas diferenças, devido provavelmente à resolução do DEM e ao próprio algoritmo de extração. Entretanto, percebe-se que a configuração da rede é muito próxima daquela digitalizada pela SANEPAR;
- c) não foram percebidos casos de canais desconectados.

6.1.1 Parâmetro $k_T = 6$

A figura 54 mostra a rede extraída com valor de $k_T = 6$, onde podem ser destacados os seguintes aspectos:

- a) este valor do parâmetro extrai apenas os canais principais;
- b) o problema relaci

Figura 52 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador TIN, com parâmetro $k_T = 4$

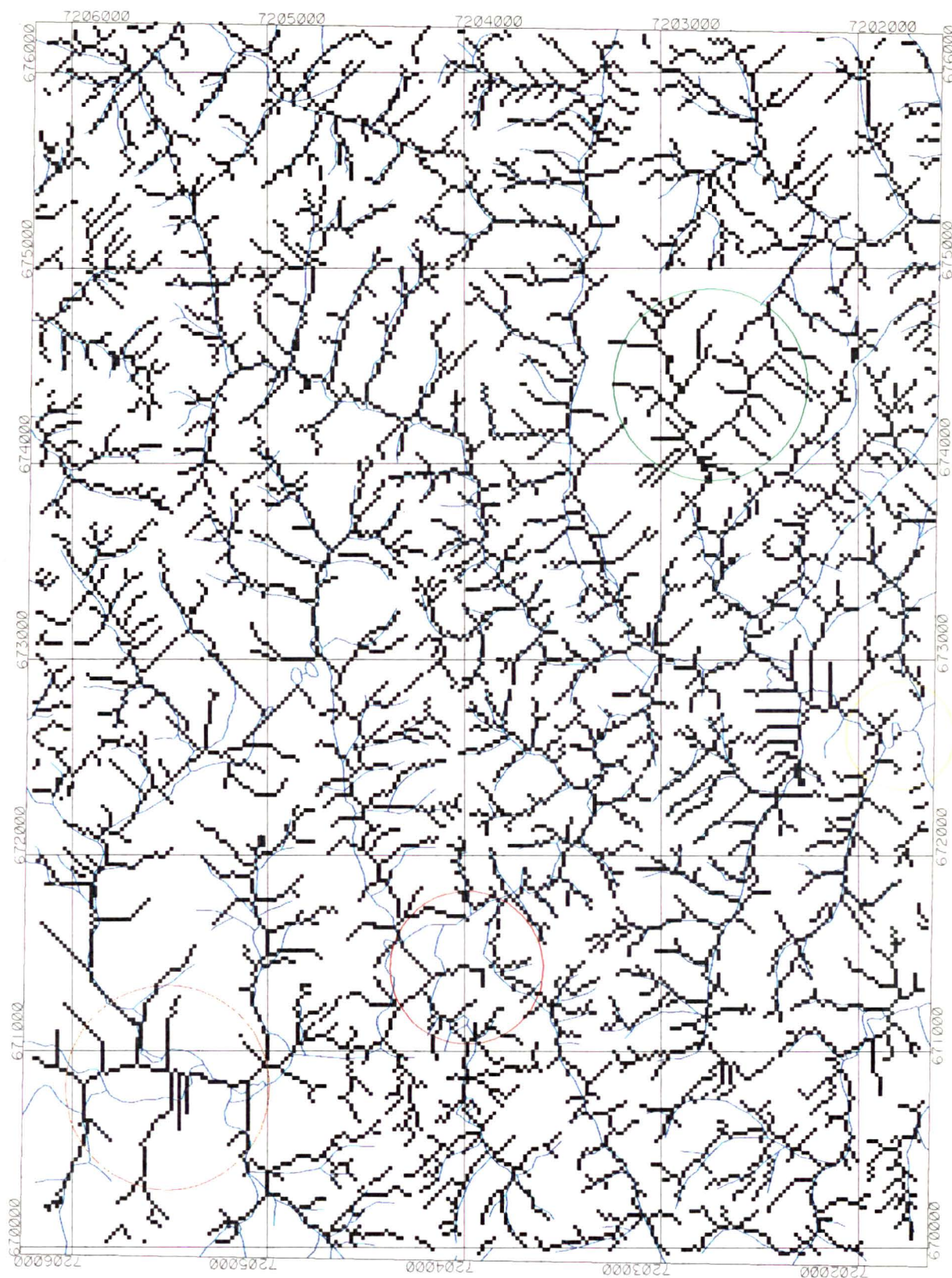


Figura 53 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador TIN, com parâmetro $k_T = 5$

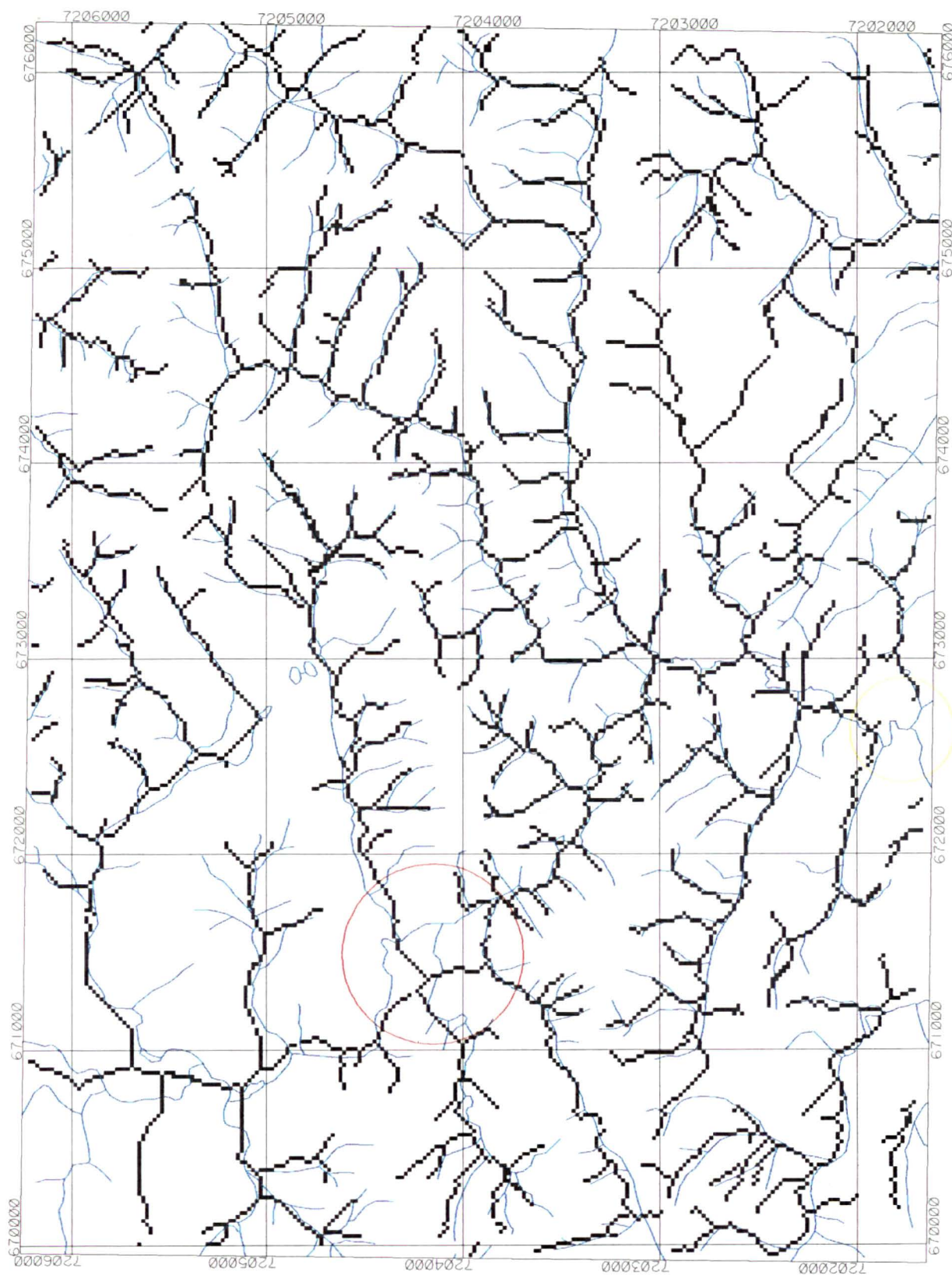
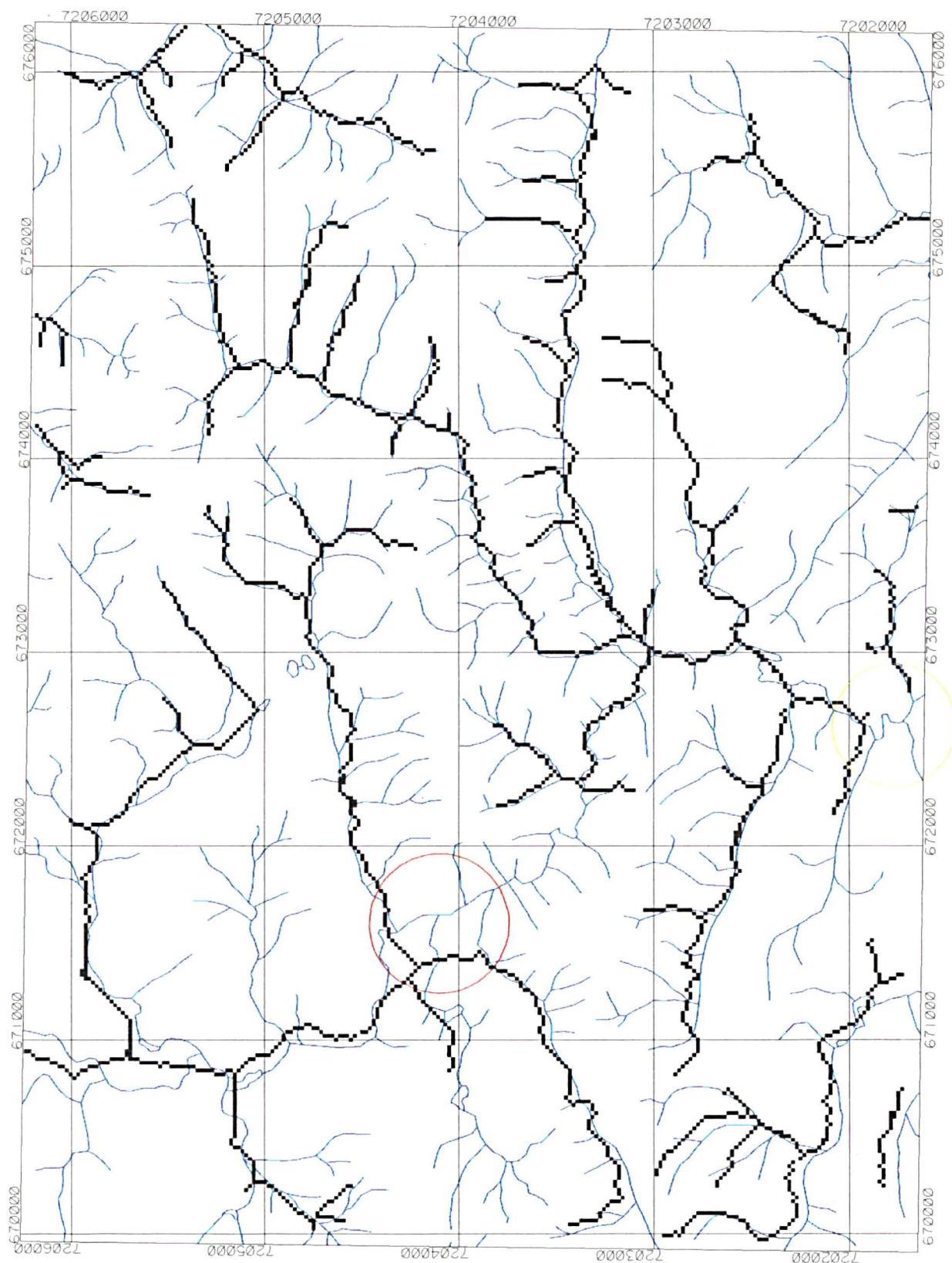


Figura 54 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador TIN, com parâmetro $k_T = 6$



6.2 ANÁLISE DA EXTRAÇÃO REALIZADA A PARTIR DO DEM INVERSO DA DISTÂNCIA

6.2.1 Parâmetro $k_T = 4$

A extração da rede de drenagem para $k_T = 4$ está na figura 55, destacando-se os seguintes pontos:

- a) novamente para este valor de k_T , foi gerada uma rede de drenagem muito densa, dificultando as análises comparativas;
- b) a área circulada em marrom apresenta linhas de drenagem paralelas, devido à sua topografia ser plana, não havendo informações altimétricas adicionais, o que dificulta ao algoritmo o cálculo das diferenças de altitude entre os pixels, além de ser formação calcária;
- c) na área em verde foram extraídos alguns canais que não se encontram na rede digitalizada. Novamente, a área é plana, além de ser formada por calcário;
- d) o ruído presente também neste DEM (mostrado na figura 45) provocou problemas na extração da área em amarelo.

6.2.2 Parâmetro $k_T = 5$

A figura 56 mostra a rede de drenagem extraída para o valor de $k_T = 5$, destacando-se:

- a) a configuração dos canais apresenta-se de acordo com a rede original, bem como as suas posições relativas;
- b) o problema relativo ao ruído no DEM utilizado para a extração (área circulada em amarelo) está novamente presente.

6.2.2 Parâmetro $k_T = 6$

Na figura 57 está a rede extraída para o valor de $k_T = 6$, com as seguintes observações:

- a) o algoritmo extraiu os canais principais da rede de drenagem;
- b) o problema relativo à área com ruído (área em amarelo) apresenta-se como nos casos anteriores.

Figura 55 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador de ponderação pelo inverso da distância, com parâmetro $k_T = 4$



Figura 56 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador de ponderação pelo inverso da distância, com parâmetro $k_T = 5$

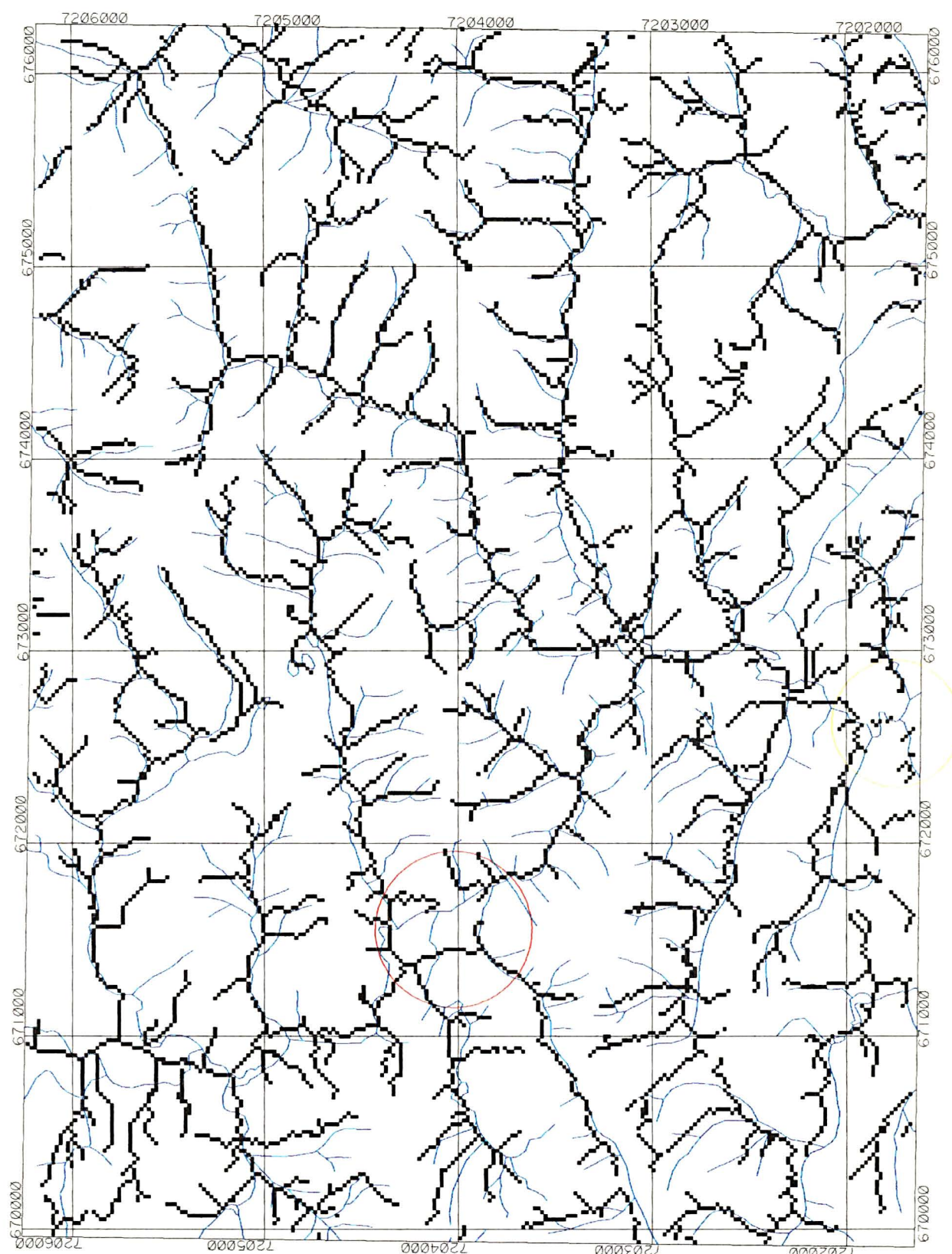
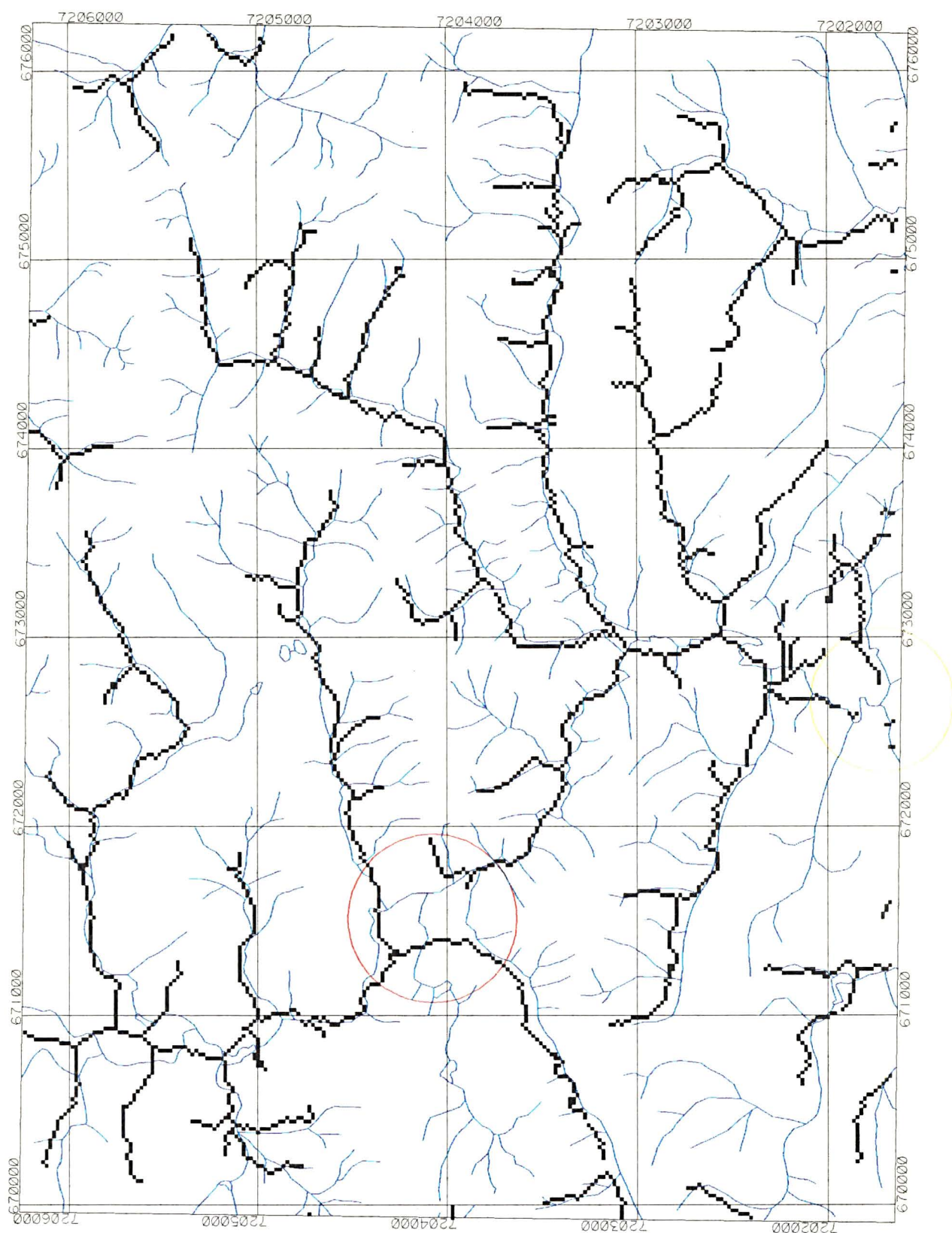


Figura 57 - Extração da rede de drenagem para o DEM gerado pelo interpolador de ponderação pelo inverso da distância, com parâmetro $k_T = 6$



6.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS DOIS INTERPOLADORES

Analisando as figuras 52 e 55, verifica-se que para o parâmetro $k_T = 4$, o interpolador TIN extraiu menor densidade de informações em relação ao interpolador inverso da distância.

A extração realizada para o DEM TIN com valor de $k_T = 4$ (figura 52) é visualmente mais agradável. Os problemas estão presentes em ambas as extrações.

Para o valor de $k_T = 5$ (figuras 53 e 56) observa-se que as configurações das redes são muito parecidas. Novamente a rede extraída a partir do DEM TIN possui menor densidade e as interseções entre os canais são melhor definidas.

Para o valor de $k_T = 6$ (figuras 54 e 57) ambos os DEM's geraram redes que possuem apenas os canais principais. Entretanto, existem diferenças entre as duas: alguns canais aparecem em um resultado mas não no outro, e vice-versa.

Ainda comparando os dois DEM's utilizados para a extração, verificam-se os seguintes fatos:

a) as características abordadas pelo algoritmo para a extração da drenagem foram confirmadas:

- 1) os canais de drenagem originam-se nos cumes;
- 2) não surgiram “loops” nos canais extraídos;
- 3) os canais não cruzaram as linhas de divisores de água.

b) os canais principais foram extraídos, mantendo-se suas posições relativas;

c) o algoritmo de extração permitiu a verificação da rede digitalizada pela SANEPAR. As áreas assinaladas em vermelho, em todos os resultados analisados, indicam que a digitalização apresenta problemas. A área em questão é topograficamente complexa, pois existe ali um divisor de águas. Devido a erros no processo de geração da carta, seja por falta de informações altimétricas, ou por falta de apoio de campo, o original utilizado pela SANEPAR para a digitalização possui alguns problemas (falta de curvas de nível, curvas incompletas). O algoritmo de extração detectou a rede com a sua configuração correta, indicando a possibilidade da sua utilização para avaliar as redes de drenagem já digitalizadas.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A obtenção das redes de drenagem é uma tarefa árdua e que consome grande quantidade de tempo. Métodos automáticos vêm sendo desenvolvidos na tentativa de racionalizar a sua obtenção. Neste trabalho objetivamos o desenvolvimento de uma metodologia para extrair automaticamente as redes de drenagem a partir de DEM's, utilizando o programa SKEL, desenvolvido na Universidade de Israel, e que pode ser obtido via Internet.

O trabalho foi desenvolvido em três etapas. A primeira consistiu da aquisição dos dados, utilizando-se a digitalização de curvas de nível por meio do “software” MaxiCAD. Os DEM's foram gerados no “software” SPRING utilizando dois métodos de interpolação: ponderação pelo inverso da distância e redes triangularizadas. A extração da drenagem foi realizada pelo programa SKEL.

Este capítulo visa fornecer as principais conclusões obtidas com o desenvolvimento do trabalho, bem como algumas recomendações.

7.1 CONCLUSÕES

Não existe atualmente um método quantitativo eficiente para determinar a acuracidade das redes de drenagem extraídas automaticamente. O nível de acuracidade do produto final pode ser estimado comparando-o com as redes de drenagem digitalizadas. A comparação, entretanto, está limitada à posição dos canais e sua configuração. Os resultados

obtidos por meio do programa SKEL foram sobrepostos com a digitalização da rede de drenagem da área em estudo, cedida pela SANEPAR, para que fossem realizadas as análises.

Apesar de dificuldades encontradas para desenvolver o trabalho, principalmente na conversão dos formatos dos arquivos, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- a) a configuração dos canais extraídos apresentou-se muito próxima da rede digitalizada, mantendo-se também a posição relativa entre os mesmos;
- b) os dois interpoladores utilizados - média ponderada pelo inverso da distância e TIN-geraram resultados muito parecidos, destacando-se apenas o fato de que para o mesmo valor de k_T o DEM TIN gerou a rede de drenagem com menor densidade menor;
- c) verificou-se que com ambos os DEM utilizados para a extração permitiram confirmar algumas características abordadas pelo algoritmo para a extração:
 - 1) não originaram-se “loops” nos canais extraídos;
 - 2) os canais de drenagem originaram-se nos cumes;
 - 3) os canais não cruzam as linhas de divisores de água;
- d) comparando as redes extraídas para os valores de $k_T = 4, 5$ e 6 , para ambos os DEM's, percebe-se que a configuração que mais se aproxima da rede digitalizada ocorre para $k_T = 5$ (mostradas nas figuras 53 e 56);
- e) os problemas na extração de alguns canais em ambos os DEM's podem estar relacionados aos seguintes fatos:
 - 1) a resolução de 20 metros utilizada para a geração do DEM pode não ser adequada;
 - 2) problemas de conversão de formatos (grb, tiff, gis);

- 3) ruídos nos DEM's, originados exatamente pela conversão de formatos de arquivos;
- f) percebeu-se que ambos os DEM's apresentaram problemas nas áreas mais planas, onde existe menor quantidade de informações altimétricas, o que provocou problemas para o algoritmo no cálculo das diferenças de altitude entre os pixels;
- g) dentro deste contexto, verificou-se que os maiores problemas ocorreram justamente na área de formação calcária;
- h) a extração manual envolve subjetividade na extração dos canais, em áreas consideradas complexas, enquanto a extração automática não é capaz de distinguir entre feições reais e artefatos, tornando ambos os métodos de extração imperfeitos.
- i) o programa para a extração da rede de drenagem permite realizar uma avaliação de redes já existentes, ou seja, verificar se tais redes estão corretas;
- j) não se pode afirmar que um dos dois DEM gerou melhores resultados. As análises realizadas foram apenas qualitativas, devido à dificuldade de desenvolver um método quantitativo para verificar a qualidade dos resultados;
- k) verificou-se que o valor de $k_T = 6$ produziu resultados satisfatórios para análises de grandes estruturas geológicas;
- l) o método é eficiente: desconsiderando as etapas de digitalização, que ainda constitui-se de uma tarefa demorada, e geração do DEM, que necessita de maiores testes, o processo de extração foi realizado em aproximadamente 10 minutos.

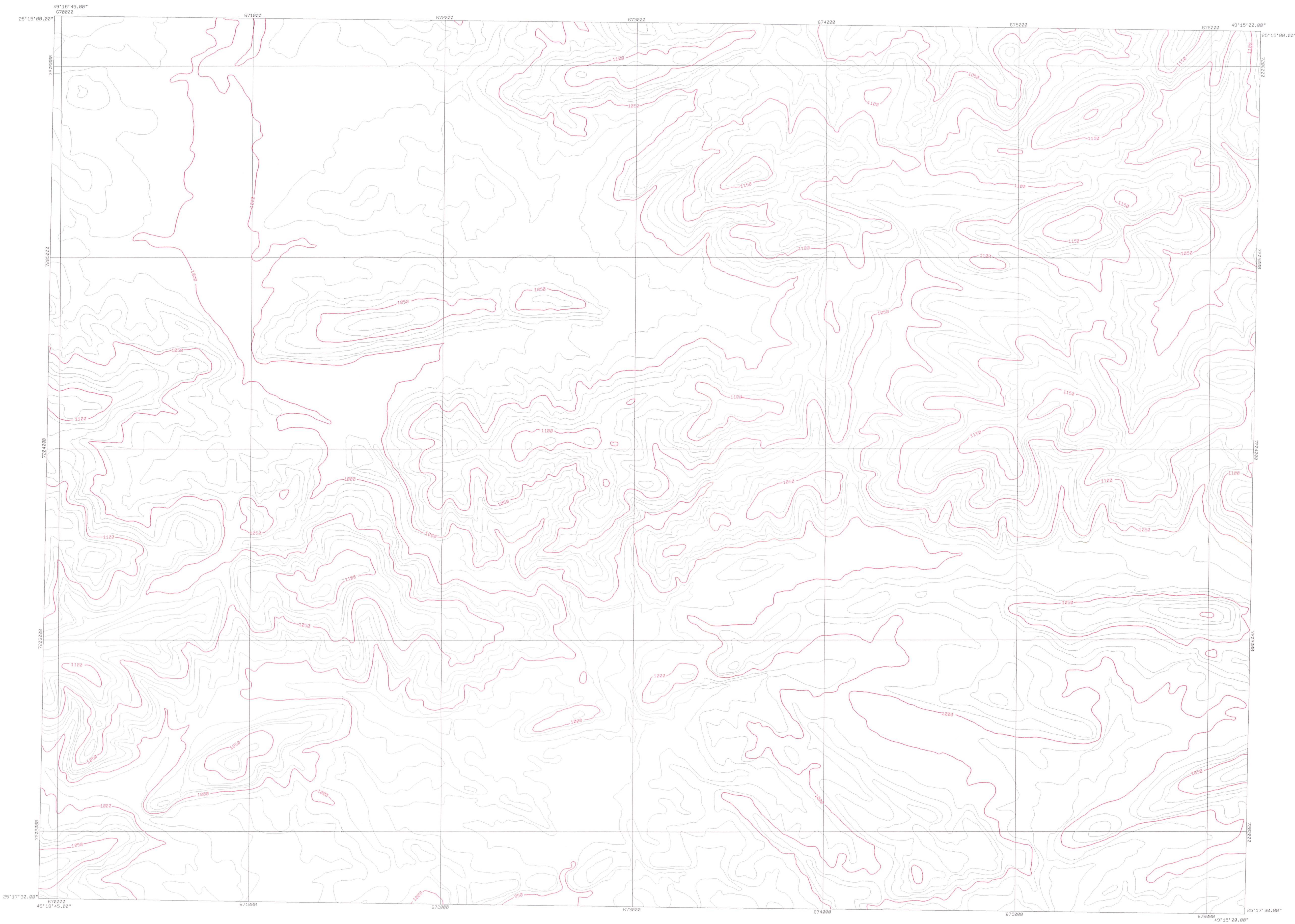
7.2 RECOMENDAÇÕES

Pelos resultados percebemos que ainda existem pesquisas a serem feitas para a geração de informações consistentes a partir de métodos de extração de drenagem. Esta é uma tarefa que está recebendo atenção particular da comunidade científica internacional, e auxiliaria em muito os vários campos de pesquisa e planejamento, principalmente nas áreas de recursos hídricos, pedologia, uso do solo, diminuindo tempo e custos. Como recomendações para trabalhos futuros segue-se:

- a) o “software” SPRING versão 1.1 não possui um formato de saída para imagens compatível com o programa SKEL. Uma solução seria converter diretamente a imagem gerada pelo SPRING para um dos formatos do programa (GIS, LAN, CLB ou GRD), para minimizar possíveis erros de conversão de formatos; outra solução seria modificar o programa SKEL para aceitar outros formatos de entrada, por exemplo TIFF ¹;
- b) viabilizar uma saída adequada para os resultados do programa SKEL possibilitando que a rede de drenagem seja obtida no formato vetorial e referenciada;
- c) utilizar uma área teste mais comportada, como por exemplo com padrão de drenagem dendrítico;
- d) implementar a extração de outras informações a respeito da drenagem (ordem dos rios, sentido de fluxo, delimitação da bacia de drenagem).

¹ a versão 2.01 do SPRING já permite a conversão para o formato TIFF, o que minimiza os possíveis erros inerentes ao processo de conversão.

**ANEXO 2 - DIGITALIZAÇÃO COM O MAXICAD DAS CURVAS DE NÍVEL
EQÜIDISTANTES DE 10 METROS**



ARTICULAÇÃO		
359	360	371
397	398	409
399	400	411

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
MERIDIANO CENTRAL 51° W
DATUM HORIZONTAL: CÔRREGO ALEGRE MG - IBGE
DATUM VERTICAL: IMBITUBA SC - IBGE

LEVANTAMENTO AEROFOTOCRAMÉTRICO - AEROFOTOS ESCALA 1:10000
RESTITUIÇÃO 1986/87 - ITCF
GRAVAÇÃO 1987 - COMEC
ESCALA 1:10000

DIGITALIZAÇÃO DE CURVAS DE NÍVEL - EQUIDISTÂNCIA DE 10 METROS

CONVENÇÕES

CURVAS MESTRAS

CURVAS INTERMEDIÁRIAS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS

EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DA REDE DE DRENAGEM
A PARTIR DE MODELOS DIGITAIS DE ALTITUDE

LUCIENE STAMATO DELAZARI
1996

ANEXO 3 - PROGRAMA PARA CONVERTER UM ARQUIVO EM FORMATO .SEQ DO MAXICAD PARA O FORMATO .ASC (PROGRAMA 1)

```
# include <stdio.h>
# include <string.h>
# include <stdlib.h>
# include <conio.h>
# define LENG 80
# define TYPES 10

/* 21/03/96 */
/* Luciene Delazari /Berutti*/
/* programa para converter um arquivo sequencial do MaxiCAD para um arquivo ASCII para entrada do
SPRING*/
/* command line Program InputFile OutputFile*/
/* nome do programa : carq.c */

void main (int argc, char *argv[LENG])
{
    FILE *inp, *oup, *fopen();
    char z, line [LENG], arqin [30], arquou[30];
    int i, nl, np;
    int ZZ;

    clrscr();
    gotoxy (15,1);
    printf ("*****\n");
    gotoxy (15,2);
    printf (" PROGRAMA PARA CONVERTER ARQUIVO SEQUENCIAL DO \n");
    gotoxy (15,3);
    printf ("MAXICAD PARA UM ARQUIVO ASC - ENTRADA DO SPRING\n");
    gotoxy (15,4);
    printf ("*****\n");
    printf ("\n\n");

    /* testa se foi digitado o nome do arquivo de entrada dos dados*/
    if (argc < 2)
    {
        printf ("Voce nao forneceu o nome do arquivo de entrada! \n");
        printf ("Digite o nome do arquivo de entrada dos dados: \n");
        gets (arqin);
        argv[1] = arqin;
        if ((inp = fopen (arqin, "r")) == NULL)
        {
            printf ("Arquivo de entrada nao pode ser aberto!\n");
            exit (1);
        }
    }

    else
    {

```

```

        if ((inp = fopen (argv[1], "r")) == NULL)
        {
            printf ("Arquivo de entrada nao pode ser aberto!\n");
            exit (1);
        }
    }

/* testa se foi digitado o nome do arquivo de saida dos dados*/
if (argc < 3)
{
    printf ("Voce nao forneceu o nome do arquivo de saida! \n");
    printf ("Digite o nome do arquivo de saida dos dados: \n");
    gets (arqou);
    argv[2] = arqou;
    if ((oup = fopen (arqou, "w")) == NULL)
    {
        printf ("Arquivo de saida nao pode ser aberto!\n");
        exit (1);
    }
}

else
{
    if ((oup = fopen (argv[2], "w")) == NULL)
    {
        printf ("Arquivo de saida nao pode ser aberto!\n");
        exit (1);
    }
}

nl=0;

fgets (line, sizeof(line), inp);
do
{
    printf ("line = %s\n", line);
    if (line[0] == 'I')
    {
        for (i=5; line[i] != NULL; i++)
            fprintf (oup, "%c", line[i]);
        nl++;
        np=0;
        fgets (line, sizeof(line), inp);
        while ((line[0] == '2') || (line[0] == '1'))
        {
            printf ("\t line = %s \n", line);
            np++;
            fgets (line, sizeof(line), inp);
        }
        fprintf (oup, "%d %d\n", nl, np);
    }
    else fgets (line, sizeof(line), inp);
}
while (!feof (inp));

fclose (inp);
fclose (oup);
exit(1);
}

```

ANEXO 4 - PROGRAMA PARA CONVERTER UM ARQUIVO EM FORMATO .SEQ DO MAXICAD PARA O FORMATO .ASC (PROGRAMA 2)

```
# include <stdio.h>
# include <string.h>
# include <stdlib.h>
# include <conio.h>
# define LENG 80
# define TYPES 10

/* 21/03/96 */
/*autores: Luciene Delazari/Berutti */
/* programa para converter uma arquivo sequencial do Maxicad em arquivo ASCII para o SPRiNG*/
/* command line Program InputFile OutputFile */
/* nome do programa : carql.c*/

void main (int argc, char *argv[LENG])
{
    FILE *inp1, *inp2, *oup, *fopen();
    char z, line [LENG], arqin1 [30],arqin2[30], arqou[30];
    int i, nl, np;
    double Z;

    clrscr();
    gotoxy (15,1);
    printf ("*****\n");
    gotoxy (15,2);
    printf (" PROGRAMA PARA CONVERTER ARQUIVO SEQUENCIAL DO \n");
    gotoxy (15,3);
    printf ("MAXICAD PARA UM ARQUIVO ASC - ENTRADA DO SPRING\n");
    gotoxy (15,4);
    printf ("*****\n");
    printf ("\n\n");

    /* testa se foi digitado o nome do primeiro arquivo de entrada dos dados*/
    if (argc < 2)
    {
        printf ("Voce nao forneceu o nome do arquivo de entrada !! \n");
        printf ("Digite o nome do arquivo de entrada dos dados: \n");
        gets (arqin1);
        argv[1] = arqin1;
        if ((inp1 = fopen (arqin1, "r")) == NULL)
        {
            printf ("Arquivo de entrada nao pode ser aberto!\n");
            exit (1);
        }
    }

    else
    {
        if ((inp1 = fopen (argv[1], "r")) == NULL)
        {
            printf ("Arquivo de entrada nao pode ser aberto!\n");
            exit (1);
        }
    }
}
```

```

    }
}

/* testa se foi digitado o nome do segundo arquivo de entrada dos dados*/
if (argc < 3)
{
    printf ("Voce nao forneceu o nome do arquivo de entrada 2! \n");
    printf ("Digite o nome do arquivo de entrada dos dados: \n");
    gets (arqin2);
    argv[2] = arqin2;
    if ((inp2 = fopen (arqin2, "r")) == NULL)
    {
        printf ("Arquivo de entrada nao pode ser aberto!\n");
        exit (1);
    }
}

else
{
    if ((inp2 = fopen (argv[2], "r")) == NULL)
    {
        printf ("Arquivo de entrada nao pode ser aberto!\n");
        exit (1);
    }
}

/* testa se foi digitado o nome do arquivo de saida dos dados*/
if (argc < 4)
{
    printf ("Voce nao forneceu o nome do arquivo de saida! \n");
    printf ("Digite o nome do arquivo de saida dos dados: \n");
    gets (arqou);
    argv[3] = arqou;
    if ((oup = fopen (arqou, "w")) == NULL)
    {
        printf ("Arquivo de saida nao pode ser aberto!\n");
        exit (1);
    }
}

else
{
    if ((oup = fopen (argv[3], "w")) == NULL)
    {
        printf ("Arquivo de saida nao pode ser aberto!\n");
        exit (1);
    }
}

nl=0;
np=0;
Z=0;

fgets (line, sizeof(line), inp1);
do
{
    if (line[0] == 'I')
    {
        fscanf (inp2, "%lf", &Z);
    }
}

```

```

fscanf (inp2, "%d", &nl);
fscanf (inp2, "%d", &np);
printf ("#Linha %d %d %lf\n", nl, np, Z);
fprintf (oup, "#Linha %d %d %lf\n", nl, np, Z);

fgets (line, sizeof(line), inp1);
while ((line[0] == '2') || (line[0] == '1'))
{
    i=2;
    do
    printf ("%c",line[i++]);
    while(i<11);
    printf (" ");

    i=11;
    do
    printf ("%c",line[i++]);
    while(i<21);
    printf ("\n");

    i=2;
    do
    fprintf (oup,"%c",line[i++]);
    while(i<11);
    fprintf (oup," ");

    i=11;
    do
    fprintf (oup,"%c",line[i++]);
    while(i<21);
    fprintf (oup,"\n");

    fgets (line, sizeof (line), inp1);
}
}
else fgets (line, sizeof(line), inp1);
}
while (!feof (inp1));

fclose (inp1);
fclose (inp2);
fclose (oup);
exit(1);
}

```


ANEXO 5 - EXEMPLO DO ARQUIVO .ASC USADO COMO ENTRADA PARA O SPRING

```
#Linha 1 15 1000.000000
676282.66 7207830.84
676261.88 7207810.66
676247.35 7207806.30
676232.92 7207811.95
676217.77 7207819.60
676203.61 7207827.24
676188.73 7207837.39
676172.32 7207845.06
676156.10 7207846.72
676140.81 7207841.37
676129.20 7207829.99
676114.91 7207824.88
676099.14 7207822.04
676083.85 7207816.44
676072.47 7207803.55
#Linha 2 10 1050.000000
669971.85 7207064.04
669972.00 7207064.04
669987.76 7207063.26
670003.22 7207061.11
670017.14 7207054.72
670030.30 7207047.08
670040.42 7207035.48
670051.80 7207025.12
670065.73 7207019.48
670081.19 7207017.32
#Linha 3 4 1050.000000
677000.00 7206540.84
676992.45 7206543.82
676989.55 7206559.36
677000.00 7206575.39
```

ANEXO 6 - MAPA DA REDE DE DRENAGEM DA ÁREA EM ESTUDO



ARTICULAÇÃO		
359	360	371
397	398	409
399	400	411

CONVENÇÕES

 RIOS PRINCIPAIS

 LAGOS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS

EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DA REDE DE DRENAGEM
A PARTIR DE MODELOS DIGITAIS DE ALTITUDE

MAPA DE DRENAGEM

1:10000

LUCIENE STAMATO DELAZARI
1996

ANEXO 7 - MAPA ORIGINAL DA ÁREA EM ESTUDO

REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA

LEVANTAMENTO
AEROFOTOGRAMETRICO
ESCALA 1:10.000

ATUALIZAÇÃO DE ARRUAMENTO - PROJETO UNIBASE
AEROFOTOS ESCALA 1:8.000 - 1985
RESTITUIÇÃO 1986/87 - ITCF
GRAVAÇÃO 1987 - COMEC

unibase UNIFICAÇÃO DE BASES CADASTRAIS
COMEC - COPEL - IPPUC - ITCF - PMC - SUREHMA - SANEPAR - TELEPAR

ARTICULAÇÃO

56 22 X		
D 1:1 SE E	D 1:1 SE F	D 1:2 SO E
359	860	371
D 1:3 NE A	D 1:3 NE B	D 1:4 NO A
367	398	409
D 1:3 NE C	D 1:3 NE D	D 1:4 NO C
399	400	411

DECLINAÇÃO MAGNÉTICA 1976
E CONVERGÊNCIA MERIDIANA
DO CENTRO DA FOLHA



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
MERIDIANO CENTRAL 51° W GR
DATUM HORIZONTAL: CÔRREGO ALEGRE M.G. IBGE
DATUM VERTICAL: MARÉGRAFO IMBITUBA S.C. IBGE

CONVENÇÕES

ARRUAMENTO E QUARTERÃO CONSTRUÍDO	PEDRA	LIMITE INTERMUNICIPAL	ESTRADAS FEDERAL	CURSO D'ÁGUA	ELEVADO, PONTE	BOSQUE	PASTO
EDIFICAÇÃO	ÁREA	LINHA INDEFINIDA	ESTADUAL	LAGOA	PINGUELA	CULTURA	CURVAS DE NÍVEL
IGREJA	LINHA DIVISÓRIA	LINHAS DE TRANSMISSÃO	OUTRAS	ALAGADO	BUEIRO	MATO	PONTO DE APARELHO
ESCOLA	CEMITÉRIO	RESERVATÓRIO D'ÁGUA	CAMINHO	CANAL	CORTE	MACEGA	PONTO DE CAMPO
AEROPORTO		TUBULAÇÃO	ESTRADA DE FERRO	VALA	ATERRO	POMAR	REFERÊNCIA DE NÍVEL
		TORRE DE RÁDIO OU TV					VERTICE

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BALCE, A. E. Determination of optimum sampling interval in grid Digital Elevation Models (DEM) data acquisition. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.53, n. 3, p.323-330, mar. 1987.

2. BAND, L. E. Topographic partition of watersheds with Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, v. 22, n. 1, p.15-24, jan. 1986.

3. BOLSTAD, P. V.; STOWE, T. An evaluation of DEM accuracy: elevation, slope and aspect. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 60, n. 11, p.1327-1332, nov. 1994.

4. BRASIL. DNAEE - Divisão de Controle de Recursos Hídricos. **Glossário de Termos Hidrológicos**, 1983.

5. BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for land resources**. 1.ed. New York: Oxford University Press, 1986.

6. CHOROWICZ, J. et al. A combined algorithm for automated drainage network extraction. **Water Resources Research**, v. 28, n. 5, p.1293-1302, mai. 1992.

7. COLLINS, S. H. Terrain parameters directly from Digital Terrain Model. **The Canadian Surveyor**, v. 29, n. 5, p.507-518, dez. 1975.

8. COMEC. **Região Metropolitana de Curitiba: levantamento aerofotogramétrico.**

Curitiba: UNIBASE, 1987. 1 mapa: p&b, 55 x 79 cm. Escala 1:10.000, SG-22-X-D-I-1-SE-E.

9. _____. _____. SG-22-X-D-I-1-SE-F.

10. _____. _____. SG-22-X-D-I-2-SO-E.

11. _____. _____. SG-22-X-D-I-3-NE-A.

12. _____. _____. SG-22-X-D-I-3-NE-B.

13. _____. _____. SG-22-X-D-I-4-NO-A.

14. _____. _____. SG-22-X-D-I-3-NE-C.

15. _____. _____. SG-22-X-D-I-3-NE-D.

16. _____. _____. SG-22-X-D-I-4-NO-C.

17. D'AGOSTINO, V.; STANGHELLINI, M.; TRISORIO, G. A FORTRAN 77 program for preliminary extraction of drainage networks based on a DEM. **Computers and Geosciences**, v. 19, n. 8, p. 981-1006, ago. 1993.

18. DYMOND, J. R.; HARMSWORTH, G. R. Towards automated land resource mapping using Digital Terrain Models. **ITC Journal**, n. 2, p. 129-138, 1994.
19. EKLUNDH, L.; MÅRTENSSON, V. Rapid generation of DEM from topographic maps. **International Journal of GIS**, v. 9, n. 3, p. 329-340, mai-jun, 1995.
20. FERNANDES, J. C. Criação de MDT's. **Revista do Instituto Geográfico e Cadastral**, n.8, p. 49-54, dez. 1988.
21. GAO, J. Comparison of sampling schemes in constructing DTM's from topographic maps. **ITC Journal**, n. 1, p. 18-22, 1995.
22. GONZALEZ, R. C.; WINTZ, P. **Digital Image Processing**. 1.ed. Ontario: Addison-Wesley Publishing Company, 1977.
23. HUSSAIN, Z. **Digital Image Processing - practical applications of parallel processing techniques**. 1.ed. London: Ellis Horwood, 1991.
24. IMAGEM GEOSISTEMAS. **SPRING: versão 1.1**. São José dos Campos, 1995, v. 1 e 3.
25. JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for Geographic Information System analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, nov. 1988.

26. KUMLER, M. P. An intensive comparison of Triangulated Irregular Networks and Digital Elevation Models. **Cartographica**, v. 31, n. 2, p. 1-41, set. 1994.
27. LEBERL, F. Interpolation in square grid DTM. **ITC Journal**, n. 5, p. 756-807, 1973.
28. MARK, D. M. Automated detection of drainage networks from Digital Elevation Models. **Cartographica**, v. 21, n. 2/3, p. 168-178, out. 1984.
29. MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from DEM. **Computers and Geosciences**, v. 18, n. 6, p. 747-761, jun. 1992.
30. McCORMACK, J. E. et al. Feature derivation of drainage networks. **International Journal of GIS**, v. 7, n. 3, p. 263-277, mai-jun. 1993.
31. MEISELS, A.; RAIZMAN, S; KARNIELI, A. Skeletonizing a DEM into a drainage network. **Computers and Geosciences**, v. 21, n. 1, p. 187-196, jan. 1995.
32. MENEZES, J. C. **Interpolação de Modelos Digitais de Terreno a partir de isolinhas**. Curitiba, 1992. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Setor de Tecnologia, UFPR.

33. MILLER, C. L.; LAFLAMME, R. A. The Digital Terrain Model - theory and application. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 24, n. 3, p. 433-442, mar. 1958.
34. MITISHITA, E. A. Modelo Digital de Terreno e suas aplicações na área florestas. In: Sensoriamento Remoto e SIG aplicados à Engenharia Florestal (1994: Curitiba). **Anais do 1. Seminário de Atualização**. Curitiba, 1994, p. 49-60.
35. MIZRAHI, V. V. **Treinamento em Linguagem C - curso completo**. 1. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1990.
36. MYLER, H. R.; WEEKS, A. R. **Computer Imaging Recipes in C**. 1. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
37. O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from Digital Elevation Data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, v. 28, p. 323-344, 1984.
38. PALACIOS-VELEZ, O. L.; CUEVAS-RENAUD, B. Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data. **Journal of Hidrology**, n. 86, p. 299-314, 1986.
39. PAVLIDIS, T. **Algorithms for Graphics and Image Processing**. 1. ed. New York: Computer Science Press, 1982.

40. PEUCKER, T. K. et al. The Triangulated Irregular Network. In: DTM Symposium (1978:St. Louis). **Proceeding of the DTM Symposium**. St. Louis, 1978, p. 516-540.

41. PRATT, W. **Digital Image Processing**. 1. ed. New York: John Wiley and Sons, 1978.

42. QIAN, J.; EHRICH, R. W.; CAMPBELL, J. B. DNESYS - An expert system for automatic extraction of drainage networks from digital elevation data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 1, p. 29-44, jan. 1990.

43. REDDY, J. M.; TURKIYYAH, G. M. Computation of 3D skeleton using a generalized Delaunay triangulation technique. **Computer-Aided Design**, v. 37, n. 9, p. 676-694, set. 1995.

44. ROBINSON, G. J. The accuracy of DEM's derived from digitised contour data. **Photogrammetric Record**, v. 14, n. 83, p. 805-814, abr. 1995.

45. ROSENFELD, A.; KAK, A. C. **Digital Picture Processing**. 2. ed. London: Academic Press, 1982.

46. SCHUT, G. H. Review of interpolation methods for Digital Terrain Models. **The Canadian Surveyor**, v. 30, n. 5, p. 389-412, dez. 1976.

47. SUDHALKAR, A.; GÜRSÖZ, L.; PRINZ, F. Box-skeletons of discrete solids. **Computer-Aided Design**, v. 28, n. 6/7, p. 507-517, jun/jul. 1996.
48. TRIBE, A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid Digital Elevation Models: a review and a new method. **Journal of Hidrology**, n. 139, p. 263-293, 1992.
49. TULADHAR, A. M.; MAKAROVIC, B. Upgrading DTM's from contour lines using photogrammetric selective sampling. **Revista Cartográfica**, n. 57, p. 57-70, jan-jun. 1990.
50. VIEIRA, A. J. B. et al. Mapeamento Digital do Sistema Aquífero Cárstico, no Sítio de Tranqueira, Região Metropolitana de Curitiba. In: VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (1996: Salvador). **Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Salvador, 1996.
51. VILLELA, S. A.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. 1. ed. São Paulo: Mc. Graw-Hill, 1975.
52. WEIBEL, R.; HELLER, M. Digital Terrain Modelling. In: MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. W. **Geographical Information Systems: principles**. 1. ed. New York: John Wiley and Sons, 1991.
53. WIENER, R. S. **Turbo C passo a passo**. 1. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1991.

54. YAMAMOTO, J. K. **Representações gráficas espaciaias em Geociências.** In: II Simpósio de Quantificação em Geociências, Rio Claro, 1986.